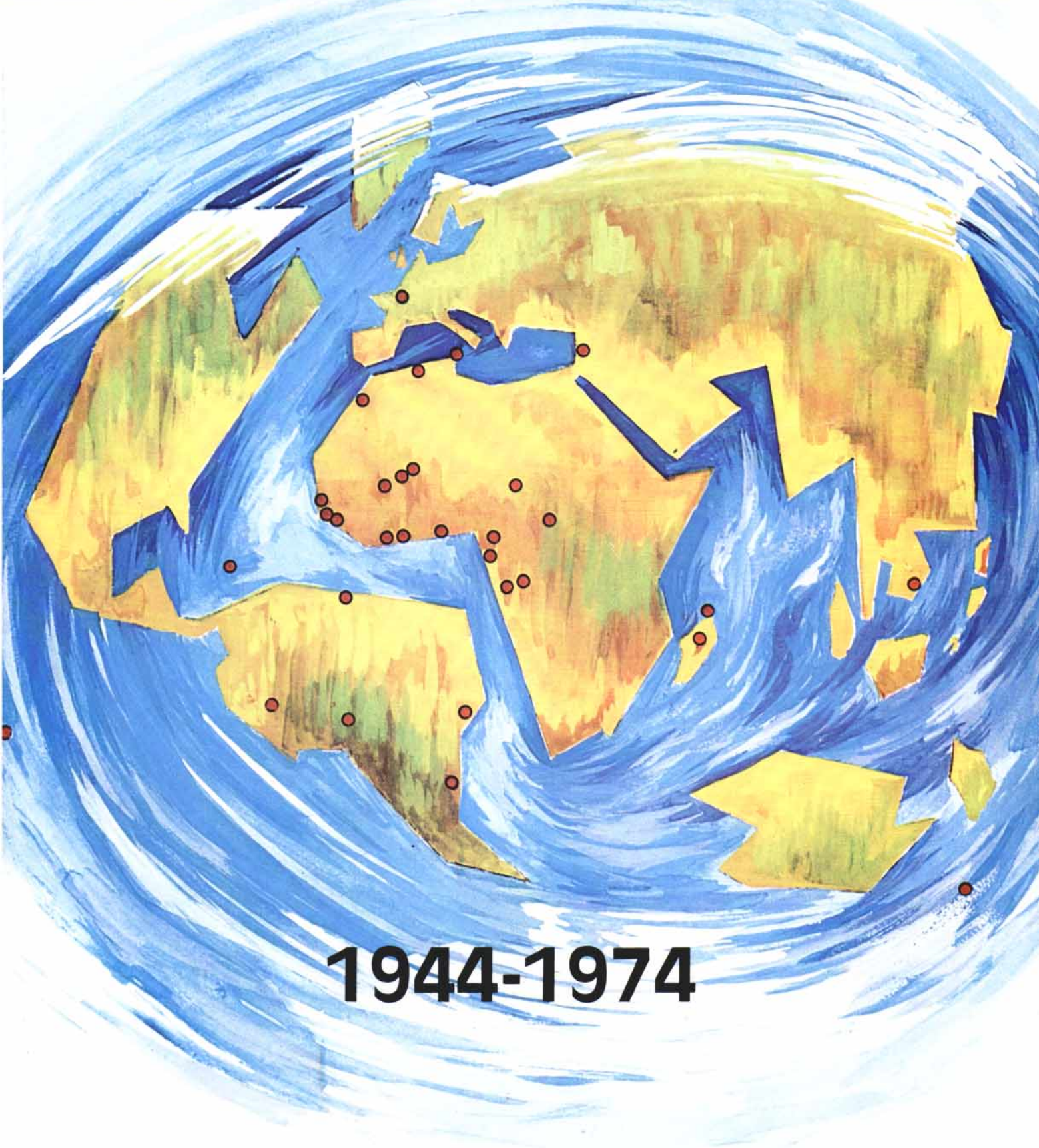


30 ANNEES DE PEDOLOGIE



1944-1974

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

TRENTE ANNÉES

DE

PÉDOLOGIE

1944-1974

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER
PARIS

Sommaire

AVANT-PROPOS	5
Résumé en langue russe	7
Résumé en langue allemande	9
INTRODUCTION	11
BILAN SUCCINCT	15
1. — Bilan cartographique	15
• Travaux réalisés	15
• Méthodes	18
2. — Bilans géochimique et biochimique	19
• Constituants minéraux	20
Altération en milieu ferrallitique	20
Distribution du fer	20
Erosion et remaniements	21
Evolution en milieux plus ou moins confinés	22
Différenciation en milieu calcaire	23
Systèmes biogéodynamiques	23
Andosols et Amorphes	24
Dynamiques actuelles sous l'action de l'eau et des sels solubles	25
• Constituants organiques	27
3. — Bilan agronomique	29
DÉMARCHES SCIENTIFIQUES - ÉVOLUTION DES CONCEPTS	31
1. — de 1944 à 1954	32
2. — de 1954 à 1966	34
3. — de 1966 à nos jours	37
BIBLIOGRAPHIE	43

Avant-Propos

1974 est une date importante, pour tous les membres de l'Association internationale de la Science du Sol qui fête son cinquantenaire, pour nos collègues soviétiques qui célèbrent un siècle d'études pédologiques depuis les travaux de V. DOKUTCHAEV.

Pour les chercheurs de l'ORSTOM, c'est également un anniversaire, celui de l'entrée des premiers pédologues, le 1^{er} Août 1944, dans cet organisme nouvellement créé. Cela leur a paru être une occasion de faire le point de leurs travaux, de revoir leurs résultats, leurs idées fondamentales et leur évolution dans le contexte de la pédologie mondiale.

Cette plaquette n'est pas un véritable bilan d'activités. Elle a pour objet d'exposer leurs concepts, d'expliquer les raisons de leur évolution, de leur adaptation au fur et à mesure de l'avancement des programmes et compte tenu aussi des progrès réalisés par les autres pédologues français et étrangers.

L'objectif statutaire de l'ORSTOM est de faire de la recherche de base, orientée vers le développement en pays tropicaux et méditerranéens. Il en résulte que les travaux n'ont été axés que sur les régions chaudes, principalement sur l'Afrique et Madagascar, moins souvent sur certains pays d'Amérique latine, d'Océanie ou du Moyen Orient. Les observations faites, les résultats obtenus, avec leurs aspects particuliers dus aux caractères climatiques et autres des régions étudiées, ont naturellement très fortement marqué nos conceptions pédologiques. Nous nous sommes efforcés sans cesse, cependant, de les rendre applicables à l'ensemble des sols du monde. Nous avons recherché une collaboration étroite avec les autres organismes pédologiques, français ou étrangers, et avec les organisations internationales ayant les mêmes préoccupations.

Cet élargissement à l'échelle mondiale a été favorisé par la venue dans notre centre d'enseignement ou dans nos équipes de France ou d'Outre-Mer, de nombreux jeunes chercheurs et étudiants étrangers, surtout d'Afrique, d'Amérique latine et d'Asie, parfois d'Europe, désireux de se spécialiser, de se perfectionner ou d'approfondir certains de leurs travaux.

La section comprend actuellement près de 100 chercheurs qui ont été formés à l'OFFICE et répartis dans ses 19 Centres et Missions. Mais nous avons également reçu comme élèves ou stagiaires depuis 1944, plus de 600 étudiants de niveau universitaire ou chercheurs, dont un grand nombre d'étrangers.

Un autre aspect des études est qu'elles doivent être aussi poussées que possible sur le plan scientifique, en même temps, tendre à répondre à des problèmes pratiques posés ou mener à des applications, principalement agronomiques. On peut prendre conscience de ces préoccupations en consultant les listes bibliographiques de l'ORSTOM. On trouvera en fin d'exposé, une énumération non exhaustive des études pédologiques les plus marquantes qui ont jalonné ces trente années de pédologie *.

G. AUBERT

* Cette plaquette a été rédigée par un groupe de pédologues de l'ORSTOM, animé par R. Maignien.

РЕЗЮМЕ

X-ый Конгресс Международного Объединения Почвоведов в Москве является поводом, для почвоведов ORSTOM, подытожить проведенные за тридцать лет исследования. Не представляя собой исчерпывающего итога, настоящий текст, в первой его части, даёт отчёт о произведенных во многих тропических областях Африки, Мадагаскара, Океании и Америки (4.500.000 км²) картографических работах. Перечень этот, после изложения использованной общей классификации, приводит к пересмотру примененных методов. Картография послужила основанием для многих исследований, а итоги геохимических и биохимических определений позволяет представить наиболее значительные из полученных результатов, в особенности что касается ферраллитного выветривания, распределения железа и известняка, неосинтезов глины, исследований по преобразованиям, андосолям и аморфным почвам, динамике почв под воздействием воды с растворимыми солями или без них, органическим компонентам. Отмечены новейшие работы в отношении биогеодинамических систем и механизмов дифференциации профилей в различных масштабах (микроскопический, профильный, ландшафтный). Изложение научных результатов дополняется агрономической сводкой.

Вторая часть является критическим изложением научных подходов в течение времени, в свете приобретенных знаний и развития употребляемых исследователями понятий. Так, объясняется каким образом задачи трудов по почвоведению побудили исследователей поставить на обсуждение некоторые основные данные и методы. Это привело к лучшему осознанию дифференциации почв в масштабе экологических сред и времени развития, — факторов, значение которых существенно для умеренных зон. После попытки обобщения относительно почвенных систем и соотношений между биоклиматической зональностью и преобладанием почв в эволюционных сериях, перечисляются трудности сопряженные с установлением морфогенетической классификации. Наконец, существенная роль исследований по современным механизмам дифференциации профилей позволяет точнее выяснить значение придаваемое понятию организации почвенных компонентов.

Текст заканчивается кратким, но охватывающим различные районы деятельности почвоведов ORSTOM, библиографическим списком.

Zusammenfassung

Der zehnte moskauer Kongress der Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft gibt den ORSTOM-Pedologen Gelegenheit einen Rückblick auf die vollbrachte Arbeit der letzten dreissig Jahren zu geben. Ohne eine völlige Bilanz darzustellen gibt der erste Teil dieses Textes einen Überblick über die vollbrachten Kartographiearbeiten in vielen tropischen Gegenden Africas, Madagascar's, Oceaniens und Americas (4 500 000 km²).

Anlässlich dieses Inventares wird die angewandte Bodenklassifikation erläutert sowie die benutzten Methoden.

Die Kartographie war der Ausgangspunkt zahlreicher Forschungsarbeiten ; und eine geochemische und biochemische Bilanz erlaubt es die hauptsächlichsten Resultate zu zeigen im Gebiete der ferralitischen Verwitterung, der Verteilung des Eisens und des Kalkes, der Tonmineralien-synthese, der Studien über Vernetzungs- und Umwendungsprozesse, der Andoböden und amorphen Substanzen, der Bodendynamik unter dem Wassereinfluss, mit oder ohne löslichen Salzen, und der Studien über die Humustoffe. Es werden ferner die jüngsten Arbeiten über die Biogeodynamischen Systeme angegeben sowie jene über die Prozesse der Bodenprofilbildung in allen Skalen. Eine agronomische Bilanz vervollständigt diesen ersten Teil.

Der zweite Teil ist ein kritischer Rückblick auf die Entwicklung unserer wissenschaftlichen Methodik infolge besserer Kenntnisse und Fortschritte in den Ideen.

Es wird erklärt wie manche Grundvoraussetzungen und Arbeitsmethoden durch die Pedologen während der notwendigen Geländearbeiten in Frage gestellt wurden.

Durch dieses erfolgte ein besseres Erkenntniss der Bodenausbildung in den verschiedenen Ökologischen Umgebungen und infolge der Entwicklungsdauer ; diese beiden Faktoren sind grundlegend in tropischen Gegenden.

Die Ausarbeitungsschwierigkeiten einer morphogenetischen Bodenklassifikation werden vorgetragen nach einem Zusammenfassungsveruch über die pedologischen Systeme und über die Zusammenhänge zwischen der bioklimatischen Zonalität und den vorherrschenden Bodentypen in den evolutif Serien. Die umfangreichen Forschungsarbeiten über die aktuellen Ursachen der Bodenprofilbildung erlaubt es besser, die Wichtigkeit die wir der Organisation der Bodenbestandteile geben, zu verstehen.

Zuletzt wird, kurz, das hauptsächlichste Schrifttum über die verschiedene Arbeitsgebiete der ORSTOM-Pedologen angegeben.

Introduction

Sur le plan mondial plusieurs définitions du sol sont utilisées. Elles correspondent à des conceptions différentes de l'objet étudié. Pour comprendre la démarche de chacun, il importe donc de connaître celles qu'il en retient. Voici les nôtres présentées dans leur évolution historique.

Lorsque la section de pédologie fut créée à l'ORSTOM en 1944, il n'y avait en France pratiquement pas d'école pédologique. Les études réalisées par les chercheurs français s'appuyaient sur une forte tradition agronomique, caractérisée, en particulier, par des études ponctuelles. Qualitativement au moins, les enseignements tirés de ce type de recherches paraissent suffisants. L'attention se portait d'abord sur la plante qui apparaissait le meilleur reflet du sol. Cependant, des considérations économiques avaient déjà amené et amenaient de plus en plus à développer des systèmes d'évaluation qui exigeaient des travaux de cartographie. Il devenait nécessaire de mieux saisir les contours de l'objet « sol » à recenser.

La conception pédologique a été introduite dans notre pays par V. AGAFONOFF et H. ERHART. Malgré les efforts de V. OUDIN et A. DEMOLON, elle ne s'est d'abord développée que très lentement, même si la cartographie pédologique, très limitée en FRANCE, prenait plus d'importance déjà en AFRIQUE DU NORD. Immédiatement après la guerre et sous l'influence dynamique de G. AUBERT les études pédologiques ont pris une rapide importance en régions tropicales, où les besoins du développement nécessitaient un inventaire rapide des ressources naturelles et d'abord des sols. Dès 1945 les premiers travaux ont été réalisés par l'ORSTOM et à la demande des agronomes, à Madagascar et en Afrique Occidentale. Ils ont consisté d'abord en des études de terrain conduisant à des cartographies régionales ou locales et détaillées suivant les cas, et, en des observations et des expérimentations en stations, l'ensemble s'appuyant sur quelques résultats d'analyses de laboratoire réalisées sur les sols les plus caractéristiques. Ces premiers travaux de pédologie tropicale se sont fondés sur la définition du sol de DOKUCHAIEV.

Le sol est considéré globalement depuis sa surface au contact de l'atmosphère jusqu'au matériau originel et, le plus souvent, jusqu'à la roche-mère dont il tire l'essentiel de ses constituants minéraux. Mais si le sol est bien défini en lui-même dans sa totalité, il n'existe pourtant qu'en fonction de son environnement et en particulier des sols qui l'entourent. C'est un corps à trois dimensions qui se transforme dans le temps et qui s'étudie à travers des profils individualisés en un plus ou moins grand nombre d'horizons.

Pour connaître un sol, il faut comprendre sa genèse, son évolution, en bref son histoire et déterminer le rôle respectif des différents facteurs intervenant dans un tel système. Notre concept est *génétique* à ce titre. Il est plus particulièrement *morpho-génétique*, car nous pensons que les mécanismes de l'individualisation du sol doivent se reconnaître dans sa morphologie. Notre première démarche est donc de distinguer, d'identifier, puis de sérier les traits morphologiques qui explicitent le mieux la connaissance du sol. A la limite, la morphologie doit livrer entièrement les processus mis en cause. Notre conception est enfin *dynamique* : les sols naissent, évoluent, meurent, et les profils ne représentent que des états instantanés le long d'une chaîne d'évolution temporo-spatiale.

Ces principes conditionnent encore notre approche. Les résultats obtenus ne sont pas envisagés en eux-mêmes, mais toujours par référence au sol, et à ses facteurs de formation, paramètres de l'environnement. Même d'un point de vue agronomique plus pratique, un sol ne peut être défini seulement par quelques caractéristiques analytiques (profondeur, texture, structure, saturation en bases, pH, etc.), ni même par un horizon particulier (horizon lessivé, horizon d'accumulation, etc.), mais par l'ensemble des données qui le caractérisent et déterminent ses possibilités d'utilisation. Ainsi à chaque niveau de saisie de l'information on se rattache pour l'interprétation au niveau immédiatement supérieur, par exemple les arrangements structuraux élémentaires aux horizons, ceux-ci aux profils, ces derniers aux sols, les sols à leur distribution dans le paysage. Il en est de même si l'on considère les différents stades d'évolution dans le temps.

Ces conceptions déterminent de même la structure de notre classification. Fondée sur l'étude morphologique des sols, cette dernière prend comme base les processus d'évolution, en fonction de leurs facteurs de formation. Chaque strate de regroupement conserve théoriquement la totalité des informations des niveaux immédiatement inférieurs. Les ensembles classifiés sont des orthotypes (1). Ils diffèrent en cela des unités taxonomiques de la classification américaine qui sont des épitomés (2).

Les **classes de sols** sont définies par le degré d'évolution, le développement du profil et certains processus fondamentaux concernant : le mode d'altération des constituants minéraux et les néosynthèses qui en découlent, le type et la répartition de la matière organique, l'hydromorphie et l'halomorphie.

A un niveau immédiatement inférieur, les **sous-classes** s'appuient plus particulièrement sur les effets des variations du facteur climatique.

Les **groupes** ensuite, correspondent à des processus généraux d'évolution des sols : lessivage, appauvrissement, remaniements, induration.

Les **sous-groupes** à des intensités variables du processus définissant le groupe ou à l'apparition des effets dans le sol de processus secondaires d'évolution.

Souvent à l'intérieur des sous-groupes, ont dû être notés des **faciès**, dénomination de tendances évolutives reconnaissables, plutôt de valeur régionale.

Les **familles** de sols sont caractérisées en fonction de la nature pétrographique de la roche-mère ou du matériau originel.

Le niveau suivant, où sont définies des **séries de sols**, est l'un des plus important avec celui des groupes et sous-groupes : « Une série de sols est l'ensemble des sols qui présentent sur un matériau originel de composition lithologique définie, et dans des positions comparables dans le paysage de même type de profil. Les profils des sols d'une série sont semblables non seulement par la succession, l'aspect et la constitution générale de leurs différents horizons, mais aussi par l'ordre de grandeur et l'épaisseur de chacun de ces derniers. Cet ordre de grandeur est envisagé en fonction de l'influence possible de la présence de chacun d'eux sur les propriétés générales des sols... ».

(1) Orthotype : concept central, autour duquel des variations sont permises.

(2) Epitomé : résume tous les caractères fixes des limites.

Enfin on retient les **types** et les **phases** de sol en fonction des caractéristiques particulières et plus ou moins stables des horizons de surfaces.

Après 30 années de recherches un certain nombre de modifications ont été apportées à la classification. Elles concernent le contenu initial des différents niveaux, le regroupement de certaines unités et leur restructuration. Par contre le schéma général et les principes de son organisation ont toujours été conservés, malgré des difficultés certaines, dans la période actuelle en particulier, à concilier la notion de sol — objet indépendant — à l'aspect apparemment continu de la couverture pédologique.

De même durant cette période notre démarche s'est adaptée. Il nous a donc semblé intéressant d'exposer l'évolution de nos concepts à travers l'ensemble de nos travaux et de leurs effets.

Pour ce faire, l'exposé qui suit est divisé en deux parties :

- dans la première, on dresse un inventaire succinct des résultats aux plans cartographiques, géochimiques, biochimiques et agronomiques ;
- dans la seconde, on analyse les différentes étapes de la démarche scientifique et ses conséquences sur l'adaptation des concepts.

BILAN SUCCINCT DE TRENTE ANNÉES DE PÉDOLOGIE

1. Bilan cartographique

Les premiers travaux se sont d'abord appuyés sur des études de détail réalisées pour résoudre des problèmes d'utilisation. Cependant il est apparu très tôt nécessaire d'effectuer des reconnaissances dans chacun des pays concernés de façon à disposer au plus vite d'un inventaire général des principaux types de sols. Commencé en 1946 par des levés à échelles variées, cet inventaire s'est orienté progressivement vers une cartographie systématique, à des échelles comprises entre le 1/50 000 et le 1/1 000 000.

Ces levés et études de terrain ont constitué et constituent encore les documents de base indispensables à la plupart de nos recherches. C'est en réalisant cet inventaire qu'ont été dégagés des thèmes de recherche et qu'ont été localisés des emplacements d'études détaillées, capables d'assurer les meilleures démonstrations. C'est à travers lui que l'on doit interpréter l'ensemble de nos résultats, comprendre nos préoccupations et juger de l'adaptation de nos méthodes.

TRAVAUX RÉALISÉS

Les travaux de cartographie exécutés peuvent être groupés en deux rubriques :

- petites et moyennes échelles, inférieures à 1/50 000. Il s'agit soit de reconnaissance, soit de synthèses réalisées principalement sur programmes de recherches de l'ORSTOM,
- cartes de détails dressées le plus souvent aux échelles du 1/20 000 et 1/10 000, faites à la demande d'utilisateurs, et aussi, et de plus en plus actuellement, pour sous-tendre des recherches fondamentales. Pour l'utilisation agronomique une carte d'aptitudes culturales complète les fonds pédologiques.

Ces cartes utilisent la classification morphogénétique française et l'on retrouve à travers elles les différentes étapes de son élaboration. Elles sont accompagnées d'un rapport ou d'une notice pédologique, comportant de nombreux renseignements d'ordre agronomique.

Depuis 1945, il a été établi plus de 1 000 coupures, avec parfois la collaboration de pédologues de certains pays étudiés. Pour la période du 1^{er} janvier 1968 à ce jour, 187 cartes ont été diffusées avec la répartition suivante :

— échelles inférieures ou égales à 1/500 000	24
— échelles comprises de 1/50 000 à 1/200 000	141
— échelles supérieures à 1/5 000	22

Au niveau des cartes synthétiques à petites échelles, pratiquement toute l'Afrique noire francophone (Zaïre excepté) est actuellement levée par nos soins, ainsi que la totalité de Madagascar, de la Nouvelle Calédonie et des Nouvelles Hébrides, une partie importante de l'Afrique du Nord et un large secteur en Ethiopie.

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES SURFACES CARTOGRAPHIÉES

ÉCHELLES	Egales ou inférieures à 1/500 000	1/200 000 et 1/100 000	1/50 000	Egales ou supérieures à 1/20 000
SURFACES	en km ²	en km ²	en hectares	en hectares
ANTILLES		2 600		268 000
CAMEROUN	475 000	84 930	1 514 500	198 756
COMORES		810		
CONGO	375 660	43 330	496 000	20 100
COTE D'IVOIRE	322 600	46 181	92 915	49 949
DAHOMÉY	115 662	123 065	435 700	67 250
GABON	30 300	52 800	891 100	86 900
GUYANE		4 543	884 100	6 400
HAUTE VOLTA	274 000	13 600	31 500	39 800
MADAGASCAR	592 000	114 290	750 000	180 000
MALI				50 000
MAROC	267 600	7 550	263 500	92 940
MAURITANIE		9 800		35 700
NIGER	250 000	8 000	11 400	
NOUVELLE CALÉDONIE	18 653	720	108 200	16 500
NOUVELLES HÉBRIDES		11 800		
R. C. A.	617 000	124 112	15 000	
RÉUNION		2 500		
SÉNÉGAL	210 000	52 212	351 000	42 000
TCHAD	700 000	396 000	170 000	355 500
TOGO	53 000	5 800	111 500	16 605
TUNISIE	82 000	5 287	1 962 200	95 312

Aux échelles égales ou supérieures à 1/200 000, tout le Dahomey et le sud du Tchad sont cartographiés. Les travaux sont avancés au Sénégal, au Nord et Centre Cameroun, au Togo, en R. C. A., au Gabon, au Congo Brazzaville et à Madagascar. Il faut ajouter de nombreuses coupures dans le Pacifique, l'Océan Indien, les Antilles, en Guyane, ainsi qu'en Algérie, au Maroc et en Tunisie. Certaines feuilles ont également été réalisées en Amérique latine (Brésil) et en Asie (Afghanistan, Liban). Au total environ 4 500 000 km² ont été levés avec plus ou moins de détails.

MÉTHODES

Depuis le début de cet inventaire, les techniques des levés cartographiques ont fortement évolué. C'est en particulier, vers 1950 qu'il a été possible d'établir des méthodes adaptées aux surfaces importantes à couvrir. La conjonction d'un premier bilan de nos connaissances pédologiques, de la publication de fonds topographiques valables et de la libre disposition de photographies aériennes, a amené des progrès considérables, en qualité et rapidité, dans la réalisation des levés pédologiques. Elle a, en outre, conduit à une planification plus systématique et mieux ordonnée des travaux. L'exploitation des photographies aériennes verticales, en particulier par les méthodes de la photointerprétation, a permis de reconnaître certaines structures géographiques qui étaient liées plus ou moins spécifiquement à la distribution des sols, d'où le succès de cette approche, particulièrement bien adaptée à la rapidité nécessaire d'exploitation. Ces méthodes se sont sans cesse améliorées, par l'utilisation, entre autres, de nouvelles émulsions : infra-rouge, couleurs, fausses couleurs. Elles se prolongent actuellement par celles des techniques de la télédétection : scanners, radars thermiques, etc.

Suivant les régions, en particulier suivant la couverture végétale, les pédologues de l'ORSTOM ont élaboré des techniques originales. Deux voies ont été parcourues :

- **l'une, partiellement aléatoire** est celle des « zones », des « bandes témoins ». Cette méthode, relativement classique, a été améliorée en recherchant de façon raisonnée, des largeurs et des orientations plus représentatives des milieux étudiés. Elle a été appliquée en régions forestières, au Cameroun, en Côte d'Ivoire et au Congo Brazzaville, dans des milieux où la végétation forme écran à la vision latérale. La recherche des relations entre l'aspect des clichés photographiques et la réalité du terrain oblige ici à des prospections au sol plus systématiques et plus détaillées, et les règles de leur application sont délicates d'emploi : utilisation des formes des versants, du dessin et de la densité des colatures, etc. ;
- **l'autre, plus élaborée**, plus compréhensive, s'est développée d'abord en région de steppes, puis de savanes, enfin sous forêts, et elle se généralise progressivement. On s'efforce de rechercher sur le terrain les lois particulières ou générales de distribution des sols en relation avec les aspects physiographiques du milieu, et l'on extrapole les limites définies ainsi sur les photographies aériennes. Pour cela, un double effort s'est avéré nécessaire :
d'abord, assurer la définition d'unités cartographiques homogènes à partir d'une caractérisation morphologique plus précise et ordonnée. Cet effort en typologie et en terminologie a montré la nécessité de nouveaux systèmes descriptifs adaptés aux différents niveaux de différenciation. Cette approche a débouché en particulier, sur l'établissement de glossaires pour la description des horizons et de l'environnement, offrant des possibilités de traitements informatiques ;

puis, étudier la distribution des unités pédologiques dans le paysage, ce qui a permis de reconnaître que certains sols s'ordonnaient d'une manière régulière en fonction du modelé et qu'ils pouvaient être reliés entre eux, soit historiquement, soit génétiquement. Ainsi des ensembles de sols, appelés parfois « paysages pédologiques », ont été mis en évidence et c'est là un résultat fondamental de cette méthode qui contribue autant à délimiter des unités naturelles qu'à mieux connaître les sols qui les constituent.

Au plan méthodologique, on débute actuellement la cartographie par un premier inventaire extensif qui permet de choisir des axes à différenciation maximum (souvent des toposéquences). Ces axes sont étudiés en détail et une attention particulière est portée aux caractéristiques des limites entre sols. On précise les règles de distribution des unités reconnues et on les confronte aux différents documents disponibles (cartes topographiques, cartes thématiques diverses, photographies aériennes). Ces enseignements servent à dessiner une première esquisse à partir des limites reconnues sur les photographies. Lors de la cartographie systématique sur le terrain, on vérifie la valeur du document établi et on étudie et caractérise en détail les surfaces circonscrites.

Les travaux se développent ainsi vers une meilleure compréhension des « unités paysagiques » où se regroupent des sols parfois fort éloignés l'un de l'autre dans le cadre des classifications actuelles. L'étude de ces ensembles ouvre la voie à des recherches sur des relations génétiques nouvelles au niveau de la couverture pédologique.

Au plan thématique ces résultats posent des problèmes de représentation. En particulier, on n'est pas encore parvenu à cartographier des « paysages pédologiques » car il y a des difficultés à corréler des ensembles pédogénétiques, plus ou moins continus dans l'espace et le temps, aux unités des classifications qui traduisent simplement des différenciations verticales (profils). Pour tenter d'exprimer certaines relations entre profils, des artifices graphiques ont été mis au point : représentation de séquences, d'associations, de complexes de sols.

2. Bilans géochimique et biochimique

Il faut signaler en premier lieu que nos études trouvent leurs motivations sur le terrain. Nous sommes d'abord des naturalistes. Nous tentons d'analyser les phénomènes de la différenciation des sols. Il en résulte que s'il est naturellement nécessaire d'assurer les observations de terrain à l'aide d'une reconnaissance toujours plus précise des constituants et de leur organisation, il est également nécessaire de déterminer les mécanismes, d'étudier leur fonctionnement et leurs causes, d'abord sur des modèles naturels simples, puis de plus en plus complexes. Enfin, il faut vérifier la valeur des résultats obtenus sur des modèles expérimentaux.

Pratiquement, les pédologues de l'ORSTOM se sont penchés sur les deux premiers stades de cette approche, à savoir : la reconnaissance des constituants et de leur organisation, l'étude « in situ » des mécanismes. Ce n'est qu'épisodiquement qu'ils ont fait appel à des modèles expérimentaux, à l'exception des études en cases lysimétriques et en parcelles d'érosion. Dans le domaine de la modélisation, il y a plutôt eu association avec des spécialistes d'autres organismes, parmi lesquels on citera plus particulièrement l'Institut National de la Recherche Agronomique de Versailles et l'Institut de Géologie de l'Université Louis Pasteur à Strasbourg, mais ce type de recherche tend actuellement à se développer.

Pour la présentation des résultats, il a paru pratique de traiter d'abord les problèmes concernant les constituants organiques, en les regroupant par processus et en suivant un ordre approximativement chronologique. Mais il faut reconnaître que là aussi, les chevauchements sont nombreux et souvent complémentaires.

CONSTITUANTS MINÉRAUX

Altération en milieu ferrallitique

Les premières études ont porté sur les processus d'altération en régions tropicales forestières et humides. Elles ont contribué à une meilleure connaissance des sols « ferrallitiques ». Ces recherches ont été réalisées d'abord à Madagascar, puis en Côte d'Ivoire, ensuite au Cameroun. Elles s'étendent actuellement au Gabon, au Congo, en R. C. A., en Guyane et dans le Pacifique sud. Les résultats obtenus sont maintenant classiques. Ils ont permis de distinguer hydrolyses, néosynthèses et cuirassements. Sous l'influence de pluies chaudes et abondantes, les silicates sont totalement hydrolysés et les éléments cardinaux des minéraux des roches (Si, Al, Mg, Ca, K, Na), sont libérés et en majeure partie évacués. Au contact de l'eau et par réaction entre eux ces ions donnent naissance à des produits nouveaux. En particulier la silice peut s'éliminer complètement ou se combiner à de l'alumine pour donner de la kaolinite. L'alumine non combinée s'individualise sous forme d'hydroxyde (gibbsite surtout), la prédominance relative de la kaolinite ou de la gibbsite étant réglée par les conditions de drainage. Si celui-ci est bon, la silice est éliminée par les eaux ; si le drainage est moins bon, la silice est mal éliminée et la kaolinite domine. Le fer, réductible et complexable, est susceptible de déplacements importants et s'accumule sous forme d'hématite ou de goethite. Sa dynamique reste cependant dépendant de la richesse en silicium du matériau en voie d'altération (cas des ferrites, altérites résiduelles, à structures plus ou moins conservées des îles du Pacifique).

Ainsi par élimination différentielle d'un grand nombre d'éléments, il se produit une concentration de constituants nouvellement formés dont les propriétés physico-chimiques marquent de manière fondamentale les sols des régions concernées.

En résumé l'essentiel de l'altération ferrallitique est un lessivage et une transformation des minéraux primaires par soustraction. Les éléments les moins lessivés s'organisent en néoformations dont les principales sont la goethite, la gibbsite et la kaolinite. C'est l'organisation de ces matériaux nouveaux, plus que les processus d'altération eux-mêmes qui caractérise les sols ferrallitiques. Mais c'est pourtant l'intensité de l'hydrolyse qui explique la convergence des différentes séquences d'évolution vers des statuts relativement simples ; d'où l'aspect apparemment monotone de ces sols. A la limite même le quartz peut être partiellement dissous.

Distribution du fer

Un second ensemble de recherches porte sur l'étude de la distribution du fer. Il a été réalisé principalement dans les régions à climats soudano-guinéens d'Afrique de l'Ouest. Les premiers inventaires avaient rapidement montré l'importance et la généralisation des accumulations de fer dans les sols tropicaux. Il a été reconnu que ces « cuirasses » n'étaient

pas obligatoirement liées à la « latérisation ». Le cuirassement est un phénomène second et facultatif au sein des profils à altération ferrallitique. Il résulte de l'immobilisation du fer transporté en partie par lessivage vertical de haut en bas, mais aussi et surtout, par circulation latérale des eaux à travers le manteau d'altération. Il peut se produire dans toute formation perméable parcourue par des eaux chargées de fer solubilisé : sols divers, terrasses alluviales, formations sableuses, brèches de pentes, etc. Il dépend des propriétés hydrodynamiques du milieu concerné.

Les conditions de libération, de mobilisation, de migration et d'immobilisation sont analysées et précisées. Elles permettent d'interpréter les paysages cuirassés d'Afrique où elles ont souvent fossilisé et protégé des formes anciennes du modelé. Les enseignements de ces études sont intéressantes.

Elles attirent l'attention sur l'importance des transports obliques de matière. « Les migrations verticales existent ». Mais « elles ne peuvent s'entretenir que par un exutoire et celui-ci est généralement latéral » et « le pédologue ne peut plus raisonner sans l'intervention supplémentaire d'une dynamique oblique ». Elles ont ouvert des voies nouvelles dans les études sur l'histoire des formations superficielles du continent africain. Nombre de cuirasses datent du début du Tertiaire, sinon du Crétacé supérieur. Elles modèlent plus ou moins fortement ou soulignent les différentes surfaces quaternaires. Elles permettent la reconstitution de l'évolution des paysages et l'appréciation de la part des héritages dans l'importance des processus actuels. Ces résultats peuvent être étendus aux régions tempérées du globe (études sur le sidérolithique par exemple).

Erosion et remaniement

Le troisième ensemble concerne les études sur l'érosion et les remaniements. L'introduction des moyens mécaniques en agriculture africaine dans les années qui ont suivi la dernière guerre a exacerbé le phénomène d'érosion du sol, en particulier par l'eau. Des conséquences parfois catastrophiques, quant aux pertes en terre, ont imposé de nombreuses recherches auxquelles les pédologues de l'ORSTOM ont été largement associés. Ces recherches se sont appuyées sur des stations d'étude de conservation, mises en place depuis 1954 en Afrique de l'Ouest et en R.C.A. Elles ont amené la mise au point de mesures de ruissellement et de pertes en terre ; précisé et chiffré les facteurs de l'érosion ; hiérarchisé la valeur conservatrice de plantes, de techniques et de systèmes culturels. Elles se prolongent actuellement en Côte d'Ivoire et Haute Volta par une analyse plus fine des facteurs du ruissellement sur modèles naturels et expérimentaux (simulateur de pluie).

Les processus d'érosion par l'eau ont été très vite rapprochés de celui du remaniement des formations superficielles. Ce dernier, en effet, est très répandu en zone inter-tropicale. Il se matérialise par la présence de matériaux grossiers dans les horizons de surface que l'on observe principalement sous climats guinéens et équatoriaux humides. Lorsqu'il se situe en surface, il apparaît lié à des mécanismes d'érosion différentielle, avec départ des fines, entraînées par l'eau et « amaigrissement » général de l'horizon. Mais ce niveau de « grossiers » peut aussi se manifester par un alignement à plus ou moins grande profondeur de débris résistants variés, que l'on désigne sous le nom de « stones lines » ou nappes de gravats. Les études concernant ces dernières sont nombreuses : descriptions détaillées, similitude entre matériaux de recouvrement et matériaux sous-jacents, relations avec la géologie et le modelé. Sur ce problème un certain nombre d'écoles se sont affrontées faisant appel les unes à l'autochtonie (mécanismes d'accumulation relative par érosion

différentielle, rôle des termites, enfouissement des matériaux grossiers dans un milieu visqueux), d'autres à l'allochtonie de type « catastrophique » (phases d'érosion et de recouvrement liées à des variations climatiques brutales) d'autres encore à l'allochtonie limitée à l'échelle d'une colline (recul de versant, déboisement).

Quoiqu'il en soit ces remaniements correspondent à des phénomènes généraux qui se sont réalisés à la faveur des aplanissements successifs ayant affecté les grandes masses continentales de la zone intertropicale africaine. Sur les pénéplaines, les matériaux de la partie supérieure des profils, parfois tout le matériau originel, ont subi fréquemment des déplacements latéraux résultant de pédogenèses et de remaniements successifs. Nombre de sédiments africains sont ainsi, et de la même façon, les vestiges de matériaux fortement évolués (ferrallitisés), érodés et transportés (Continental Terminal, Sables Tertiaires, etc.). Des zones alluviales étendues ont conservé la marque de pédogenèses passés : ouest de Madagascar, delta central nigérien. Ces résultats précisent l'influence des héritages qui masque parfois les différenciations liées à d'autres pédogenèses et limite souvent les évolutions plus récentes.

Evolution en milieux plus ou moins confinés

Les études précédentes concernent principalement les sols des régions les plus humides. Cependant des recherches pédologiques nombreuses ont été menées aussi en régions tropicales et subtropicales plus sèches et à climat contrasté. On y a reconnu et défini des types de sols variés à différenciations tranchées : sols ferrugineux tropicaux, sols fersiallitiques, sols bruns eutrophes, vertisols, planosols, solonetz solodisés pour les plus courants.

Au niveau des constituants, les vertisols se caractérisent par leurs teneurs élevées en argiles gonflantes (montmorillonites surtout).

Par contre les autres sols présentent toute une gamme de faciès argileux intermédiaires et/ou un mélange de kaolinite et de montmorillonite. Ces faits ont amené à opposer deux types de milieux de pédogenèse : les milieux lessivants où l'eau circule avec facilité et s'évacue par un exutoire — les produits mis en solution sont constamment éliminés — ; les milieux confinants où les eaux de percolation s'évacuent plus ou moins lentement ou même pas du tout, la permanence des niveaux hydrostatiques est assurée par l'évaporation et les produits apportés en solution s'accumulent. Suivant le débit, c'est-à-dire la pluviosité et la pente motrice, la température, la nature des minéraux des roches et leur porosité, l'évolution conduira soit vers la gibbsite et la kaolinite pour les plus lessivés et acides, soit vers la montmorillonite pour les plus cumulatifs, neutres à basiques. A ces mécanismes s'ajoute la durée d'évolution. En particulier sur roches basiques les sols juvéniles sont proches des faciès à montmorillonite : ce sont les sols bruns eutrophes qui, avec le temps et suivant le milieu évolueront soit vers un pôle soit vers l'autre.

Cette dualité permet de comprendre une des raisons de la prédominance, dans les régions tropicales, des sols à kaolinite ou à gibbsite sur les hauteurs mieux drainées et celle des sols à argiles 2/1 dans les bas pays où le drainage est ralenti.

L'ensemble de ces résultats suppose des migrations importantes, principalement obliques, de produits en solution provenant des reliefs. Il complète ceux obtenus dans l'étude sur la distribution du fer dans le paysage. Mais ces différenciations latérales peuvent être plus ou moins masquées, voire effacées par l'érosion. Il est difficile alors de faire la part respective des mécanismes en cause.

Différenciation en milieu calcaire

En pays méditerranéens, à climats subtropicaux, on observe les mêmes types de relations, mais à des échelles différentes, généralement plus courtes (pluviosité et températures moins agressives). Sur les hauteurs plus arrosées les ions solubles sont évacués. Les illites et les chlorites des roches font place dans les sols à des vermiculites. Sur les parties les plus basses et souvent aussi les plus arides, il y a enrichissement en silice et passage aux illites-montmorillonites.

Plus caractéristique encore de ces régions est l'évolution du calcaire. Il tend à s'éliminer sur les reliefs, après altération pelliculaire pour les roches les plus dures, et la fraction insoluble s'accumule d'année en année pour donner la matière des sols fersiallitiques. Ces derniers sont donc en grande partie la résultante d'une accumulation relative et d'une évolution en place d'un matériau silicaté résiduel. Ces processus paraissent beaucoup plus actuels et actifs qu'il est admis jusqu'à ce jour.

Le calcaire en solution migre à travers les fissures des roches ou, par ruissellement, à leur surface. Il s'accumule dans les régions les plus arides en formant dans les sols des horizons spécifiques (sols à profil calcaire différencié).

Il est démontré que ces horizons d'accumulation se forment suivant des mécanismes généraux comparables à ceux des cuirasses ferrugineuses. Le calcium migre verticalement et obliquement à la fois et se piège de glacié en glacié. On observe latéralement sur ceux-ci la même séquence morphologique que celle qui différencie de bas en haut dans les profils : accumulation diffuse, amas, granules, nodules, encroûtements, croûtes, dalles. L'apparition de minéraux argileux fibreux de type attapulgite est associée à cette accumulation.

Ainsi se précisent et se nuancent les enseignements tirés des études précédentes et plus particulièrement ceux sur les différenciations pédologiques liées aux transports latéraux.

Systèmes biogéodynamiques

Jusqu'alors les études ont porté ou sur des profils, ou sur des paysages. Il devient nécessaire de relier ces deux niveaux d'organisation afin de mieux comprendre comment se constitue dans certains cas le « continuum » pédologique. Il faut étudier les modalités du passage d'un sol à l'autre et tenter de saisir la réalité des limites. Ce type d'études a été mené au Tchad, et ses enseignements sont considérables. Il se prolonge actuellement en Haute Volta et au Cameroun.

Ces recherches ont obligé d'abord à reconnaître l'échelle des différenciations entre profils, ce qui a amené à examiner des séries de fosses profondes (plusieurs mètres), très serrées (intervalles de quelques mètres), le long de toposéquences courtes et contrastées (ordre d'une centaine de mètres).

Dans les régions étudiées, sous des conditions climatiques comparables, mais sur des matériaux différents, on observe une succession constante de sols, à savoir de haut en bas des pentes : sols ferrugineux tropicaux lessivés, sols hydromorphes, planosols, solonetz solodisés, vertisols. Cette succession se compose ainsi d'un domaine amont lessivé et acide, opposé à un domaine aval d'accumulation plus basique. Il est reconnu que la limite entre ces deux ensembles est oblique et dessine des marches d'escalier qui remontent à l'aval.

Des analyses nombreuses, et des calculs poussés, confirmés par des observations micromorphologiques, démontrent que les horizons lessivés des sols des parties hautes de la chaîne « nourrissent » les horizons d'accumulation de ceux de la partie basse. Les hydrolyses en amont amènent à des néoformations de kaolinite ; les accumulations en aval développent la montmorillonite, soit par transformation, soit par néoformation. Les minéraux interstratifiés se situent à la frontière de ces deux domaines.

Il apparaît que les relations entre ces domaines sont interdépendantes. En effet si l'amont nourrit l'aval, ce dernier se transforme progressivement avec l'accumulation par modifications des conditions hydrodynamiques et physicochimiques et change à son tour les conditions amont immédiatement voisines. On débouche ainsi sur la notion de système. C'est, dans le cas considéré, une structure « biogéodynamique » où chaque partie influe sur le tout. La matière en voie de migration est utilisée et bloquée successivement en fonction des différentes barrières géodynamiques rencontrées. Ces dernières se déplacent ensuite vers l'amont au fur et à mesure de la mise en place des traits pédologiques « aval ». On a pu parler ainsi d' « invasion remontante de la montmorillonite ». Complémentairement on peut remarquer, toutes choses restant égales par ailleurs (climat, roche-mère, érosion), que le système comporte en lui-même un mécanisme d'auto-développement. Mais si l'un des facteurs externes d'évolution change, l'équilibre se déplace dans un sens ou dans l'autre. Il peut même, à la limite, être détruit.

Il est enfin démontré que certaines formes de modelé sont les résultantes directes des actions pédologiques : cas de glacis lessivés à sols ferrugineux tropicaux, des glacis d'accumulation à vertisols par exemple.

L'ensemble de ces résultats confirme et précise des mécanismes de différenciations pédologiques non seulement verticales mais aussi horizontales. Il démontre et prouve une fois de plus que le sol est étroitement lié à son environnement et, en particulier, aux sols voisins.

Ces conclusions obligent à orienter une partie de nos recherches vers le recensement et l'étude des différents systèmes pédologiques.

Andosols et Amorphes

Depuis d'assez nombreuses années, l'attention a été attirée par l'aspect particulier des différenciations pédologiques sur les roches volcaniques. Bien que ces sols occupent des surfaces relativement restreintes, leur fertilité généralement élevée a été une raison supplémentaire pour tenter de les mieux connaître.

Les études ont été entreprises surtout aux Antilles, en Amérique latine, à Madagascar, au Cameroun et aux Nouvelles Hébrides. Les sols observés sont pour leur majorité classés en andosols. Ils possèdent des propriétés physiques et chimiques particulières inconnues pour la plupart des autres sols, ce qui a conduit à entreprendre une analyse minéralogique et chimique poussée de leurs constituants. On remarque en effet que ces sols contiennent une forte proportion de substances paraissant amorphes aux rayons X, que l'on désigne généralement sous le nom d'allophanes.

L'étude des facteurs d'évolution de ces sols a permis de préciser outre le rôle des roches volcaniques riches en verres, celui du climat : les sols les plus riches en « amorphes » sont situés dans les régions les plus pluvieuses et les plus régulièrement humides.

Un fort drainage interne favorise à la fois le renouvellement rapide des solutions et la formation des allophanes. Ces derniers se développent sur des matériaux jeunes (quaternaire récent). Ainsi au Cameroun on distingue les andosols sur formations volcaniques récentes, des sols ferrallitiques sur basaltes anciens. Cette évolution est également favorisée par la finesse du matériau originel.

Les connaissances sur ces sols ont été, pour une grande part, subordonnées à la mise au point de techniques nouvelles adaptées à leurs caractères particuliers : destruction des structures aux ultra-sons, méthodes cinétiques de dissolution des « amorphes » en particulier. Les possibilités d'extraction offertes par cette dernière méthode s'étendent d'ailleurs à l'étude d'autres catégories de sols (sols fersiallitiques et ferrallitiques par exemple).

L'ensemble des résultats est important. Au Cameroun, en région tropicale humide, l'évolution géochimique des silicates est reconstituée : roches volcaniques, allophanes, halloysites, métahalloysites avec deux issues, gibbsite d'un côté, kaolinite de l'autre. Sous l'influence de la saison sèche, en partie par destruction de la matière organique, apparaît l'halloysite qui évolue progressivement vers la kaolinite des sols ferrallitiques typiques.

Aux Nouvelles Hébrides c'est une variation progressive des conditions climatiques en rapport avec le relief qui entraîne une modification progressive des processus d'altération. En allant de la région climatiquement la plus humide (sommets perhumides) à celle la plus contrastée (bas versant « sous le vent »), on observe la succession suivante : andosols désaturés et gibbsitiques, andosols saturés, sols bruns eutrophes, sols ferrallitiques ou fersiallitiques suivant les cas. Il a également été reconnu des chronoséquences pédologiques, présentant les mêmes successions de différenciations, et fonction de l'âge des matériaux originaux.

Ainsi les schémas esquissés lors des études précédentes se nuancent et se précisent. Les régions à orogénèses récentes, généralement accidentées, portent des sols jeunes marqués fondamentalement par les roches sous-jacentes. La différenciation verticale est la plus apparente. Sur les vieilles plateformes africaines qui ont subi une très longue histoire et ont été soumises à des conditions climatiques multiples et souvent extrêmes, les sols sont la résultante de processus variés, suggérant des transports latéraux importants, les différenciations obliques se généralisent. Des héritages nombreux, cuirasses par exemple, jalonnent ces migrations, et compliquent d'autant leur interprétation.

La dualité verticale et latérale, est également fonction à la fois des quantités d'eau arrivant au sol (rôle de la pluviosité) et des possibilités de percolation à travers la couverture pédologique (rôle de la porosité et de la pente motrice). En milieu aride, l'eau drainant à faible profondeur, les différenciations sont surtout verticales ; un lessivage croissant amorce des différenciations latérales, de plus larges étendues vers les régions humides ; dans ces dernières, la différenciation peut déborder la pente, souvent même le paysage et finir par échapper à des études trop localisées.

Dynamique actuelle sous l'action de l'eau et des sels solubles

De préoccupation plus récente, un dernier ensemble regroupe les recherches sur la dynamique actuelle des sols sous l'action de l'eau. Ces études concernent deux domaines : celui de la circulation de l'eau sur et dans les sols et les systèmes de sols ; celui de la pédogenèse en sols « jeunes » soumis à un excès d'eau (sols hydromorphes) et/ou à l'action

de sels solubles (sols halomorphes). Elles ont un objet commun : dégager les relations entre la morphologie et le comportement hydrique. Dans ce but elles sont orientées vers les problèmes soulevés par les travaux de terrain basés sur des études morphologiques. Il devrait en résulter une meilleure exploitation des données d'observation en vue de buts pratiques, agronomiques en particulier.

Les résultats concernant la circulation de l'eau ont été obtenus essentiellement en Côte d'Ivoire et au Tchad suivant deux voies complémentaires : des recherches sur le régime de l'eau du sol par l'établissement de profils hydriques saisonniers ; la mesure du drainage vertical en cases lysimétriques, associée ou non à la mesure du ruissellement et du drainage oblique, pour tenter de saisir directement les termes du bilan hydrique, et déterminer, qualitativement et quantitativement, les éléments transportés par les eaux.

L'une et l'autre de ces approches a obligé à la mise au point de techniques nouvelles : cases ERLO (érosion/lessivage oblique) par exemple — et les améliorations dans ce domaine sont continues.

Une masse considérable de données a été constituée ; toutes ne sont pas encore exploitées. Mais elles permettent déjà de préciser l'importance et l'intensité de l'entraînement des fines en milieu ferrallitique, les pertes en éléments fertilisants sous différents types de cultures, les mécanismes de l'économie en eau vis-à-vis des plantes.

Les recherches concernant la pédogenèse des sols « jeunes » soumis à l'hydromorphie ou à l'halomorphie portent principalement sur l'influence des variations du régime hydrique tant saisonnier que pluri-annuel. Trois types d'évolution sont à l'étude :

- celui concernant les « polders » des bordures du lac Tchad qui met en évidence le rôle de l'organisation pédologique acquise par les sédiments après leur exondation sur la dynamique des sels dans le milieu. L'étude tente un bilan géochimique du phénomène d'accumulation des divers éléments (Na, K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn, etc.) dans un milieu continental, confiné, humifère, en climat subaride. Des recherches comparables sur les sols gypseux sont menées en Tunisie ;
- celui concernant les sols de « mangrove » du Sénégal. L'évolution est dans ce cas commandée par la transformation des composés du soufre, en milieu organique et réducteur ;
- le troisième type concerne une alternance submersion-assèchement annuelle et d'amplitude variable. Cette évolution est celle des sols hydromorphes. Son étude, abordée au Tchad et à Madagascar, révèle l'importance des phénomènes physiques de gonflement et de retrait.

Il est trop tôt pour dresser le bilan certain de ces programmes. On peut cependant rappeler que ces études concourent à :

- fournir une meilleure connaissance du cycle des sels en zone aride ; de la caractérisation et du bilan des composés du soufre ;
- révéler l'importance du cycle du fer dans ces milieux, son incidence sur la morphologie, et améliorer ainsi les outils descriptifs dont dispose le pédologue (notions de gley et de pseudogley) ;
- mettre en évidence les mécanismes de néoformation et de transformation des minéraux argileux dans les matériaux jeunes, plus ou moins confinés et en début d'évolution.

CONSTITUANTS ORGANIQUES

Les pédologues ORSTOM ont toujours porté une attention particulière aux composés organiques du sol, que ce soit dans la description des horizons supérieurs ou de certains horizons d'accumulation, ou que ce soit du point de vue analytique. Mais sauf dans quelques cas récents, il n'y a eu que peu d'études entièrement consacrées à la matière organique. De toute façon cette dernière a été considérée non pas isolément, mais comme un constituant intervenant dans un ensemble d'autres facteurs morphologiques, physiques ou chimiques.

Il en résulte que les travaux sur la matière organique ont consisté généralement à établir des corrélations entre les variations de telle ou telle fraction de la matière organique, soit dans le profil, soit en surface, en fonction du temps, et des autres propriétés des sols : fertilité, structure, éléments minéraux divers.

C'est ainsi que l'on a pu montrer l'importance respective de ces fractions dans la fertilité générale, l'accumulation en surface des bases, du phosphore, du soufre, dans la stabilité structurale, la rétention d'eau, la perméabilité, ou au contraire, dans l'appauvrissement en colloïdes des horizons de surface, le transport et la redistribution des sesquioxides en profondeur.

Assez peu d'études expérimentales ont été menées pour la démonstration directe de ces phénomènes. Les études à caractère biochimique, pour préciser la nature des constituants organiques ou leurs liaisons avec la matière minérale, ont été peu développées, et pour la plupart, en liaison avec le laboratoire de pédobiologie du C. N. R. S. à Nancy. L'utilisation de techniques plus élaborées, comme par exemple l'emploi du C 14, n'a progressé que ces toutes dernières années.

Les premiers travaux réalisés ont permis de reconnaître les relations entre la matière organique des sols et leur fertilité, ceci en liaison avec des expérimentations culturales en station, ou des observations en plein champ, et de suivre l'évolution de cette matière organique en fonction du temps, dans des essais de longue durée, ou dans des expériences en parcelles d'étude sur l'érosion.

C'est ainsi que le rôle de la matière organique du sol a été spécialement étudiée en R.C.A., au Mali, en Côte d'Ivoire, au Sénégal, au Congo, au Cameroun, à Madagascar. Des propriétés comme la rétention d'eau, la perméabilité, la capacité d'échanges de bases ont été également corrélées avec les teneurs en matière organique. Des corrélations statistiques ont montré l'importance de l'action de diverses fractions de l'humus sur la structure : action positive des fractions insolubles dans les alcalis, action négative des fractions les plus mobiles (acides fulviques).

Dans le cadre d'études sur la pédogenèse, l'influence de ces fractions a été aussi mise en évidence, soit sur la lixiviation des bases ou le lessivage de l'argile, soit action plus complexe sur la mobilisation des sesquioxides, tout ceci principalement dans les régions à climat tropical humide. Dans les régions plus sèches, leur action est importante sur la mobilisation du calcaire.

Parmi les études plus spécialisées, il faut signaler les travaux consacrés aux relations entre les différents types d'humus et l'évolution des sols sous différents climats ; par exemple, pour les sols ferrugineux tropicaux de Côte d'Ivoire, ou les sols ferrallitiques forestiers de ce même pays, ou pour les podzols, sols ferrallitiques et sols hydromorphes côtiers de Guyane et du Brésil, ou pour les sols isohumiques d'Iran, du Maroc, de Tunisie, du Niger et d'Ethiopie.

Il faut indiquer enfin, l'étude du rôle des matières organiques dans les sols hydromorphes du Tchad, du Sénégal et de Madagascar en particulier, sur les propriétés d'oxydo-réduction et sur l'évolution d'éléments comme le soufre, le fer, ou les sels solubles.

Parmi les résultats, il paraît démontré que les humus des régions tropicales humides sont à rapprocher, au point de vue de leur composition chimique, du type **mull forestier**, mais avec un degré de polymérisation plus faible que dans les sols tempérés, malgré souvent une forte teneur en humine. Des types proches des **moder** et même, mais très rarement, des **mor** s'observent plus exceptionnellement sous l'influence de « climax stationnels » soit en altitude, soit sur des substratum particulièrement sableux, ou dans des sols très acidifiés par lixiviation, par exemple dans certaines régions équatoriales comme la Guyane. Les sols du type **ando** de leur côté, présentent une accumulation très importante de matière organique fortement liée à la matière minérale.

Il semble exister par ailleurs une certaine zonalité des humus en fonction des climats, la longueur de la saison sèche par rapport à la saison des pluies favorisant le processus de maturation physico-chimique qui suit la décomposition biologique. Dans les régions les plus humides à forêt sempervirente, le taux d'extraction de la matière humique alcalinosoluble est relativement élevé ; la fraction acide fulvique est dominante ; le taux d'acides humiques gris est inférieur à 50 % des acides humiques totaux ; la fraction dite « surévolue » de l'humine est faible. Au fur et à mesure que l'on va vers les régions plus sèches, ces caractéristiques se modifient dans le sens d'un accroissement relatif de la fraction insoluble, de l'augmentation des acides humiques à grosse molécule, et de la fraction « surévolue » de l'humine. De même la fraction soluble, ou acide fulvique, diminue progressivement par rapport aux acides humiques dans les régions à climats plus contrastés et à longue saison sèche. Dans ces derniers cas le caractère sableux ou argileux du substratum, surtout s'il s'agit de montmorillonite, joue un rôle important dans la nature de l'humus.

Dans les sols profonds, les matières organiques interviennent peu au niveau de l'altération primaire de la roche-mère, mais par contre elles paraissent favoriser dans les horizons supérieurs des sols ferrallitiques une dégradation secondaire de la kaolinite par l'action des composés organiques acides. De même, les matières organiques jouent un rôle important dans l'accumulation et la lixiviation des bases, dans la migration des sesquioxydes et peut-être de l'argile au sein du profil pédologique.

Il faut enfin signaler une étude récente entreprise en collaboration avec l'Université brésilienne de Salvador de Bahia où l'on a utilisé les variations du ^{14}C naturel de l'atmosphère pour suivre ensuite dans le sol par des mesures très fines, le temps de formation et le temps de résidence du carbone organique dans chaque fraction de l'humus. C'est ainsi que l'on a pu mettre en évidence la relative jeunesse de la fraction humine de la partie supérieure du sol, alors que celle des horizons sous-jacents est beaucoup plus ancienne.

Les recherches biologiques bien que fort importantes pour la connaissance des constituants organiques, n'ont pratiquement pas été le fait des pédologues, une section de biologie des sols étant à l'ORSTOM plus particulièrement chargée de ce domaine d'étude. Il est nécessaire cependant d'en signaler les principales orientations, du moins par rapport aux problèmes qui nous concernent plus spécifiquement.

Dans une première phase les programmes se sont attachés à l'étude des activités microbiennes et à leurs possibles applications agronomiques (cycles de l'azote, biodynamique de la matière organique).

Dans une seconde, recouvrant d'ailleurs plus ou moins la première, l'effort s'est concentré sur l'étude approfondie des mécanismes microbiens apparaissant plus particulièrement importants dans le cadre des problèmes de développement, telle l'extension de la riziculture au Sénégal.

Enfin l'étude de l'action pédologique de la faune des sols ne s'est développée qu'assez tardivement. Elle s'est d'abord orientée vers un travail de synthèse bibliographique et d'enseignement conjointement à une mise au point des techniques. Puis elle a donné lieu, d'une part à des études de laboratoire, notamment sur le rôle des animaux vivants ou morts dans les processus d'humification, et d'autre part, à des observations et à des études de terrain, en particulier, sur les vers de terre et les termites.

3. Bilan agronomique

Dès leurs premiers travaux, les pédologues ORSTOM ont étudié les possibilités d'utilisation des sols pour différentes cultures irriguées ou non, et l'influence de leurs caractères sur les rendements obtenus. Tout au long des années écoulées, ils ont poursuivi ces recherches souvent en collaboration avec d'autres organismes français ou étrangers et il est difficile de faire le partage entre ce qui leur revient en propre et ce qui est le fruit d'une collaboration avec d'autres. Il faut souligner toutefois une attitude à laquelle ils attachent une particulière importance, d'une part relier toute expérimentation locale à un type de sol et si possible à une unité définie sur la carte pédologique, d'autre part, corrélérer aux traits pédologiques les facteurs de la fertilité.

Les pédologues furent d'abord amenés à travailler pour et avec les services techniques existants suivant deux directions principales :

- **la cartographie d'aptitude culturelle des sols**, bien développée à Madagascar, mais aussi, à des degrés divers, dans la plupart des pays d'Afrique Noire (Congo Brazzaville, Côte-d'Ivoire, Cameroun, Dahomey, Mali, Sénégal, Tchad, R. C. A., etc.), ainsi qu'aux Antilles françaises et à la Réunion. Les superficies étudiées comme les échelles (1/10 000 à 1/100 000) étaient très variables et dépendaient essentiellement des demandes. Cette action s'est également étendue à l'Afrique du Nord, Maroc et Tunisie surtout, où les études précédant la mise en valeur lui furent en grande partie confiées, études faites principalement à 1/50 000 en Tunisie, à échelles plus grandes au Maroc (1/5 000 à 1/50 000) ;
- **la fertilité des sols** : dans un domaine encore peu exploré en pays tropical, son but principal fut alors de déterminer les aptitudes culturelles et de vérifier les capacités des sols à porter une ou plusieurs cultures successives. On peut citer les travaux faits sur arachide au Sénégal et au Congo Brazzaville, sur bananier en Guinée et au Cameroun, sur cacaoyers en Côte d'Ivoire, sur caféiers en R. C. A., sur cultures irriguées (plus particulièrement riz et cotonniers) au Mali et au Maroc.

A partir de 1958 on constate un certain ralentissement de ces activités. Malgré deux études sur des superficies importantes au Togo et en Côte d'Ivoire, la cartographie d'aptitude culturelle à grande échelle est sérieusement réduite. Elle se poursuit cependant en Afrique du Nord. En contrepartie des recherches à caractère plus général, quoique toujours orientées sur la solution de problèmes agricoles, sont développées. Des cartes d'utilisation des sols, de possibilités agronomiques, pastorales et forestières, sont réalisées au niveau de grandes zones écologiques, au Niger pour les domaines sahéliens, en Côte d'Ivoire pour ceux des forêts et des savanes tropicales humides. Il en est de même pour les études de physique du sol : porosité, perméabilité, stabilité structurale et leurs applications à l'évolution des terres cultivées en phases de cultures et de jachères. Les parcelles expérimentales établies pour suivre les phénomènes d'érosion permettent de tester les divers systèmes de mise en valeur, de pratiques culturelles et de régénération en fonction du ruissellement

superficiel et des pertes en terres (Côte d'Ivoire, Dahomey, Madagascar, R. C. A., Sénégal, Tchad). On établit entre autre, que la fraction argileuse et les matières organiques fraîches sont enlevées les premières d'où des répercussions importantes sur la stabilité des agrégats qu'elles conditionnent en grande partie.

La dynamique des particules colloïdales et des éléments minéraux sous l'action des eaux de percolation commence à être étudiée très en détail dans une cellule spécialisée du Centre d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire), ainsi qu'au Tchad, particulièrement sous culture, sous jachères et sous végétation naturelle.

En climat semi-aride et aride (Maroc, Tchad, Tunisie) les préoccupations des chercheurs sont orientées vers l'étude des problèmes liés à la présence des sels, à la mise en valeur des sols salés et à l'utilisation des eaux salées pour l'irrigation ; ceux relatifs à l'amélioration des sols irrigués et en général, ceux d'aptitudes culturelles sous irrigation.

Une mention particulière doit être faite au sujet d'études très détaillées sur les possibilités de régénération du cèdre, du chêne-liège et les possibilités de développement des plantations d'eucalyptus au Maroc. Les résultats obtenus montrent l'influence des facteurs du sol régissant les conditions hydriques en période estivale, en particulier les conditions du drainage et de l'hydromorphie temporaire au niveau de certains horizons.

Enfin, des études d'évolution de sols sous cultures irriguées ou non et sous jachères (en Afrique du Nord, au Sénégal, au Congo, au Cameroun, en R. C. A.) apportent de nombreux enseignements qui permettent de préciser certains processus physiques et chimiques de « l'épuisement » des sols cultivés et de leur « régénération » par la jachère, les engrais et les amendements.

La fertilité naturelle d'une terre sous culture continue, diminue rapidement lors des premières années après défrichement mais ensuite elle tend à se stabiliser. C'est donc à l'établissement, par des pratiques culturales convenables, d'un seuil à des niveaux compatibles avec de bons rendements, qu'il faut s'attacher.

Parallèlement, les chimistes continuent à étudier la dynamique des éléments biogènes du sol. Ils réalisent un effort de mise au point de techniques analytiques mieux adaptées aux sols tropicaux que les procédés précédemment utilisés : le dosage du phosphore assimilable, entre autres, en est un exemple. La transposition au champ des nouvelles méthodes pour vérification et application est aussitôt entreprise (Antilles, Côte d'Ivoire, Cameroun).

Dans la période récente, sans abandonner les activités précédemment citées, les efforts sont coordonnés autour du thème général suivant : étude des conditions et des mécanismes de l'évolution des sols sous l'influence des techniques de mise en valeur. L'objectif principal consiste à déterminer les processus de l'évolution des diverses catégories de sols lorsqu'ils sont soumis à divers types d'exploitation, de façon à déduire avec plus de précision les modes d'intervention permettant le maintien et même l'amélioration du potentiel de productivité.

Bien qu'il soit un peu tôt pour apprécier les résultats de cette orientation, on peut citer un certain nombre de résultats sur les assolements à base de cotonniers et d'arachide en Côte d'Ivoire, au Cameroun et au Tchad. Au Liban on s'est surtout attaché à suivre la dynamique du calcaire sous l'effet des eaux d'irrigation et, en Tunisie, celle du gypse. Parallèlement se manifeste un effort de synthèse pour collecter et mettre en ordre les données obtenues sur les caractères de fertilité des sols tropicaux et leur amélioration possible. Enfin, l'outil analytique continue à s'améliorer, en particulier en ce qui concerne la détermination du soufre, du phosphore et du gypse, ainsi que le fractionnement de la matière organique.

DÉMARCHES SCIENTIFIQUES

ÉVOLUTION DES CONCEPTS

Le bilan précédent a mis en évidence une succession dans le temps de divers travaux pédologiques. Ces derniers ont été d'abord suscités par la variété des besoins des utilisateurs, mais ils résultent également d'une évolution progressive des concepts. C'est ainsi que les premiers pédologues de l'ORSTOM ont abordé l'étude des sols par les aspects physiques, chimiques et biologiques des profils qu'ils observaient. Cette démarche alors assez caractéristique de l'Agronomie française a été peu à peu, et de manière plus intuitive que raisonnée, remplacée par une approche plus spécifiquement pédologique. Les chercheurs se sont efforcés de considérer en premier lieu le sol dans son ensemble (profils, extension, plus tard distribution) et par rapport aux facteurs du milieu, n'abordant qu'en second lieu l'étude des constituants et des propriétés qui en résultent.

Malgré certains essais (en épistémologie par exemple) il est difficile d'appréhender les principales étapes de cette évolution. Cependant, d'un point de vue chronologique, on peut distinguer trois périodes : 1944-1954, 1954-1966, 1966 à nos jours. Néanmoins, il ne faut pas donner à ces limites une trop grande signification. On doit en effet souligner que les divers concepts d'évolution des sols ne se sont pas simplement succédés. Ils se situent dans un long cheminement au cours duquel les conditions particulières du milieu invitaient à recourir à un nouveau schéma en faisant constater l'insuffisance des principes précédemment retenus et incitaient à la recherche d'une interprétation plus satisfaisante. Bref, cette évolution a été progressive et sinueuse et les dates avancées ne doivent pas être prises dans un sens trop étroit, car elles peuvent être sensiblement différentes suivant les régions considérées.

Dès le commencement de leurs travaux les pédologues de l'ORSTOM ont retenu le concept morphogénétique. La morphologie des sols doit pouvoir révéler leur mode de formation puisqu'elle enregistre la résultante des phénomènes entrant en jeu dans cette évolution, l'ensemble des phénomènes de transformation et de distribution des divers constituants aboutissant aux différenciations observées.

L'objectif est d'étudier les sols pour connaître leur mode de formation et d'analyser leurs propriétés en les situant dans le contexte de leur évolution. La démarche de base est l'étude de toutes leurs différenciations afin d'approcher les règles de la distribution de la matière au sein de la couverture pédologique. Ceci doit permettre de formuler des

hypothèses sur les processus physico-chimiques, biologiques et sur les transferts de matières susceptibles d'expliquer la genèse des sols. Ces hypothèses reposent sur les données de base et sur les connaissances disponibles dans chacune des disciplines scientifiques correspondantes. A l'heure actuelle cette attitude est encore assez coutumière.

1. de 1944 à 1954

Les concepts de départ

Pendant la première période, l'étude des sols reste fondée sur un concept d'évolution principalement verticaliste, autochtoniste et actualiste.

- *Verticaliste* : le sol est très simplement défini par son profil jusqu'à la roche sous-jacente non altérée. Les seuls processus mis en cause pour la différenciation des horizons sont des mouvements de transport verticaux avec, tout au moins au début, une action importante accordée aux accumulations par remontée. Cette attitude résulte d'une connaissance très insuffisante des régimes réels de circulation de l'eau dans les sols.
- *Autochtoniste* : les sols dérivent strictement de l'évolution d'une roche sous-jacente, d'où des études poussées très tôt sur les processus d'altérations et sur les relations entre sols et formations géologiques. Il faut rappeler que les priorités d'interventions amènent à étudier ces altérations dans des formations encore mal connues du socle africain « les granito-gneiss », plutôt que sur des niveaux sédimentaires, d'où l'attention portée dès cette époque à l'influence des roches éruptives en place et de leurs minéraux primaires.
- *Actualiste* : les profils sont la résultante des conditions actuelles du milieu, principalement du climat, ce qui explique l'importance accordée, du moins au début, au principe de la zonalité des processus, sinon des sols eux-mêmes.

La méthode pédologique

Le pédologue n'étudie donc que des profils et à leur niveau principalement les relations entre horizons, ce qui limite le nombre de données descriptives ; de plus, les termes employés sont souvent mal définis et trop interprétatifs. Il cherche pourtant à déterminer le mieux possible la nature des roches sous-jacentes. Il tente enfin de rapprocher les données connues sur le milieu et plus particulièrement sur le climat aux quelques résultats analytiques disponibles et à ceux de la morphologie, compte tenu des théories alors admises.

Ses raisons

Plusieurs raisons conjuguant leurs effets expliquent cette attitude :

- d'abord les conditions mêmes dans lesquelles sont réalisés l'inventaire et l'étude des sols, conditions imposées par l'importance des surfaces à couvrir. L'échelle spatiale oscille pratiquement entre deux extrêmes : une reconnaissance sur itinéraires consistant en des observations discontinues généralement à petite échelle ; des prospections systématiques à grande ou très grande échelle, réalisées à des fins agricoles. On conçoit l'importance certaine accordée au principe des zonalités qui facilite l'extrapolation des résultats.

- il faut ajouter la relative difficulté pratique d'atteindre et d'observer les formations illuviales plus ou moins profondes et le manque de moyens adaptés de laboratoire. Par exemple, en ce qui concerne les mouvements d'argile, on manque de critère pour distinguer avec certitude les formations illuviales, celles provenant de transformation en place et même, dans certains cas, les niveaux alluviaux, ce qui n'empêche d'ailleurs pas d'avancer des explications faisant intervenir le lessivage.
- les traits pédologiques des milieux tropicaux sont mal connus. Ils sont décrits en faisant référence à ceux des milieux tempérés et il est délicat de s'en dégager. En ce sens certains constituants, tels les composés du fer, susceptibles de donner des accumulations figurées facilement identifiables et résistantes, ont été plus rapidement interprétés.
- en raison de l'insuffisante analyse des horizons illuviaux une attention particulière est portée aux formations éluviales (surtout en région sèche), plus faciles à atteindre et à étudier et plus immédiatement déterminantes pour les propriétés agricoles des sols. Ceci peut expliquer en partie la place relativement privilégiée toujours accordée aux processus de lessivage dans la classification française.

Les premiers résultats

Malgré ces difficultés et ces imperfections, les résultats obtenus au long de cette période sont importants, suffisamment même pour marquer encore profondément certaines données utilisées à ce jour. De grandes catégories de sols sont reconnues et définies : sols steppiques (isohumiques), sols ferrugineux tropicaux, sols ferrallitiques, en particulier. Les facteurs principaux de leur évolution sont déterminés : altération, lessivage, matière organique. L'ensemble des données permet l'établissement d'une classification des sols tropicaux qui malgré des adaptations et précisions nombreuses, structure encore profondément notre schéma explicatif actuel.

Sur le plan agronomique les résultats sont aussi fort intéressants. Les exigences édaphiques d'un certain nombre de cultures sont précisées : arachide, cacaoyer, caféier, cotonnier, riz irrigué, bananier, ananas, etc. Les premières cartes d'utilisation des sols et d'aptitudes culturales sont établies sur des bases d'ailleurs diverses à Madagascar, au Tchad (casier de Bongor), au Mali (delta central nigérien), au Congo (Vallée du Niari), etc. Certaines sont prétexte aux premières tentatives de cartographie pédologique, à Madagascar et au Congo Brazzaville en particulier.

Leurs valeurs et leurs limites

Cependant, on a pu très tôt, vers 1950, constater les limites de cette première approche, lorsqu'il s'est agi plus particulièrement de développer la cartographie des sols et d'en exploiter les résultats. Il était impossible, par exemple, dans les tentatives de mise au point d'interpréter le dynamisme réel de la matière. Notre conception initiale se révélait trop souvent inapte à expliquer certains caractères des sols. Il s'imposait d'inclure dans les schémas explicatifs le facteur temps et les éventuelles variations des facteurs de formation des sols dans le temps (climat et végétation essentiellement). Il était aussi nécessaire de concevoir des apports ou des pertes latérales de matière d'où l'importance rapidement donnée au concept « chaîne de sols », trop souvent d'ailleurs limité à un aspect cartographique. Ces enseignements obligeaient à observer non seulement

les horizons d'une façon plus fine et objective, mais aussi à étudier les variations des profils à travers le paysage. Il en a résulté des voies d'approche nombreuses et variées qui se sont développées au cours de la période suivante.

2. de 1954 à 1966

La seconde période se caractérise par deux approches principales correspondant d'une part au développement plus ou moins systématique de la cartographie à moyenne échelle et, d'autre part, à celui des moyens de laboratoire. Il en résulte une meilleure couverture du terrain et une caractérisation plus poussée des sols qui fait ressortir les limites des principes précédemment appliqués et obligent à les adapter et à les compléter. Les relations latérales entre sols s'imposent et leur interprétation est recherchée dans les mouvements obliques de matière. Pourtant les tentatives de bilan montrent l'insuffisance de simples transports latéraux plus ou moins uniformes. Il faut introduire un facteur historique. Ce dernier consiste à faire intervenir des successions de conditions climatiques discontinues et il y a de grosses difficultés à en faire le cumul : système polygénétique, biorhéxistase, etc. Une voie est offerte par l'étude des relations sol-forme du modelé.

Les besoins en études pédologiques

Comme suite aux résultats précédemment acquis, l'intérêt porté à la connaissance des sols en vue de l'aménagement des territoires, s'exprime par des demandes nombreuses, accompagnées des moyens indispensables à ces entreprises, et permettant une meilleure structuration des équipes de terrain et le développement des moyens logistiques de laboratoire. Des techniques nouvelles apparaissent et se développent. Elles permettent de répondre aux problèmes posés par les surfaces considérables à couvrir (exploitation de la couverture aérienne), et la nécessité d'une caractérisation quantitative du matériau sol (méthodes analytiques mieux adaptées et surtout plus rapides).

Les distorsions entre milieux écologiques

Il faut faire ici une distinction entre les zones sèches et les zones humides. Dans les premières les nécessités d'une exploitation extensive mais diversifiée (élevage, cultures de subsistance et industrielles, utilisation du domaine forestier), en face d'un milieu fragile et excessivement sensible à l'érosion, imposent de nombreux travaux de cartographie systématique (Nord-Cameroun, Haute Volta, Niger, Tchad, Sénégal, etc.). Ceux-ci sont rendus possibles par des relatives facilités de pénétration et d'observations latérales du paysage (pseudo-steppes, savanes plus ou moins ouvertes). Sous une apparente monotonie, due en particulier à un modelé peu accusé et à un cuirassement étendu, des différenciations courtes, contrastées mais ordonnées sont rapidement mises en évidence.

En zone humide, l'exploitation agricole est localisée et intensive, et les demandes concernent soit des travaux de cartographie à grande échelle, soit des études de fertilité. Mais l'inventaire systématique de la zone reste tributaire d'une pénétration pratiquement limitée aux chantiers et aux ouvrages de génie civil (déboisements, tranchées de routes, de

chemins de fer, etc.). Or, ces pénétrations se réalisent ordinairement suivant une orientation mal adaptée à une couverture pédologique aux différenciations peu contrastées. Ces dernières en effet, s'ordonnent perpendiculairement aux courbes des niveaux, alors que les voies d'accès, ou suivent les interfluves, ou longent les bordures des vallées et ne recourent que les bas de pentes.

Ces différences de possibilité d'accès au terrain ont amené un décalage, encore bien marqué aujourd'hui, entre les connaissances sur les sols des régions à climats contrastés et celles sur ceux des régions plus humides (cas particulier de la distribution des sols ferrallitiques).

L'approche des résultats

Cette époque correspond également à la sensibilisation aux phénomènes d'érosion et aux problèmes réels posés par la conservation des sols en cultures mécanisées. Les valeurs élevées fournies par les mesures de ruissellement et de transports superficiels par l'eau (en Casamance et en Guinée) ne sont pas sans influencer sur l'importance accordée par la suite aux processus de remaniement et de transports de surface dans l'évolution et la différenciation des sols (horizons appauvris, remaniés, colluvionnés, stonelines, etc.).

Conjointement les méthodes et les techniques évoluent par rapport à la période précédente. Elles sont mieux adaptées et plus spécifiques.

Sur le terrain les observations se multiplient et la notion de chaînes de sols, « catena », s'impose progressivement ; cette dernière tend à devenir l'un des éléments de base des études. Parallèlement et de façon complémentaire, les descriptions deviennent plus fouillées, plus objectives, plus quantifiées, aidées en cela par les expériences étrangères (Soil Survey des Etats-Unis en particulier).

Dans les laboratoires, de nouveaux moyens physico-chimiques sont en place ; ils se généralisent, se diversifient et deviennent d'usage routinier. Ils se complètent des méthodes nouvelles de l'analyse minéralogique des constituants du sol et plus particulièrement des minéraux argileux.

Les enseignements

L'interprétation repose alors sur des données de terrain et de laboratoire plus sûres et plus complètes. Elles disposent, par ailleurs, de modèles géochimiques élaborés dans des disciplines voisines (géologie des altérations). Les schémas proposés sont dominés par l'importance des migrations latérales de matières. Suivant les cas, la distribution observée semble la conséquence ou la résultante soit de remaniements et de mouvements superficiels des matériaux constitutifs des sols, soit de migrations internes d'éléments solubilisés, (par exemple le fer), ou/et figurés (fines diverses, dont les minéraux argileux), soit, et ceci est le cas le plus fréquent et le plus difficile à analyser, de l'interférence de ces processus.

De façons analogues, le facteur temps est pris en compte mais de façons diverses : dans certains cas les différenciations sont expliquées par l'acquisition successive de caractères au gré des variations dans le temps des facteurs de la pédogenèse (schéma polygénétique), dans d'autres cas l'explication fait plus ou moins appel au schéma cyclique des géologues

où alternent des phases de pédogenèse (action biochimique) et des phases de morphogenèse (actions mécaniques dominantes). C'est là en partie la théorie biorhéxistatique. Il n'en reste pas moins de nombreuses difficultés du fait de la sommation au cours du temps de processus dont on n'enregistre que la résultante. Les conséquences des ordres de succession des conditions anciennes du milieu sur la conservation ou l'évolution de certaines catégories de sols sont soulignées. Les critères d'explications s'appuient plus particulièrement sur la nature et la disposition des matériaux hérités. On doit se rappeler à ce sujet que dans un paysage donné ne sont dominants, sinon conservés, que les traits pédologiques caractéristiques des conditions les plus longues et les plus agressives. Ceux des climats plus secs et/ou plus frais, ceux correspondant à des périodes plus brèves, sont ordinairement et ultérieurement effacés lorsqu'ils sont repris par des processus plus intenses ou plus prolongés. De même, des phases d'orogénèse peuvent effacer les traits pédologiques anciens : érosions d'altérites par abaissement du niveau de base, effondrement et sédimentation, recouvrement par des cendrées volcaniques, etc. La tectonique permet ainsi d'expliquer certaines dominances ou certaines carences pédologiques dans le paysage.

Les connaissances nouvelles

Les résultats correspondants à cette deuxième période sont fort nombreux. Ils amènent d'abord à une meilleure caractérisation des unités de sols déjà définies ; d'autres sont reconnues : sols à montmorillonite, tels les vertisols et les sols bruns eutrophes, solonetz solodisés, sols à profils calcaires différenciés, sols fersiallitiques, sols gypseux, etc.

Le rôle du drainage interne dans la néosynthèse des constituants pédologiques est éclairci ; il introduit les notions importantes de milieux lessivants et de milieux confinants. La mise en évidence de roches-mères d'origine pédologique montre l'importance des héritages sur les différenciations actuelles et permet d'étendre certaines conclusions aux sols des régions tempérées. Enfin, l'avancement de la cartographie systématique à moyenne échelle, qui est la base de travaux de planification régionale, permet la réalisation de nombreuses synthèses pédologiques à petite échelle (1/1 000 000). La comparaison et la critique des différentes formes de distribution introduit à des études de géographie des sols, riches d'enseignement.

Du point de vue agronomique la cartographie d'aptitudes culturales se rationalise et s'uniformise ; les processus d'évolution des sols sous cultures sèches et irriguées sont étudiés et certains mécanismes sont éclaircis ; des mesures pour la conservation des sols et la lutte contre l'érosion par l'eau sont présentées et conseillées ; les conditions du développement et de la régénération de diverses espèces forestières (au Maroc et en Côte d'Ivoire) sont éclairées.

La classification des sols

La classification des sols tropicaux subit de profonds remaniements dans sa structure et son contenu. Une classe nouvelle est constituée pour grouper les sols « d'argiles noires tropicales », celle des vertisols, suivant en cela la 7^e approximation de l'U. S. D. A. D'autres classes sont aménagées, celle des sols isohumiques anciennement dénommée « steppique »,

où des sous-classes sont distinguées pour les sols des régions subtropicales arides et ceux des régions tropicales subarides ; les sols bruns eutrophes tropicaux sont introduits dans la classe des sols brunifiés. Mais surtout l'ancienne classe des « sols à hydroxydes individualisés et à matière organique rapidement minéralisée » éclate en deux : celle des sols ferrallitiques et celle des « sols riches en sesquioxydes ».

Les niveaux supérieurs de la classe des sols ferrallitiques sont entièrement restructurés. Certains caractères disparaissent (obligation de la présence de gibbsite), d'autres sont adaptés (rapport K_i égal ou inférieur à 2). Les sous-classes sont différenciées d'après leur degré de saturation. De nouveaux groupes sont proposés : sols appauvris (départ d'argile en A sans accumulation corrélative en B), sols remaniés (présence de niveaux d'éléments grossiers), sols pénévulés (déphasés par rapport à l'évolution normale, décapage de l'horizon de surface par exemple ou apports superficiels).

Les sols riches en sesquioxydes regroupent les sols ferrugineux tropicaux pour lesquels l'accent est mis sur les relations entre le colmatage de l'horizon B illuvial et ses possibilités d'immobilisation du fer (concrétionnement, cuirassement) et les sols fersiallitiques où on retrouve entre autres, les sols rouges dits « méditerranéens ».

La classe des sols hydromorphes est réorganisée suivant les différents types de régimes hydriques.

Cependant cette nouvelle classification n'est pas entièrement satisfaisante. Elle ne prend pratiquement pas en compte les mouvements internes et superficiels latéraux. Le facteur historique n'est pas intégré dans un schéma évolutif suffisamment synthétique et général.

Les interprétations sont délicates, voire divergentes (suivant les régions et les échelles de travail) et ces difficultés vont dominer le début de la période suivante.

3. de 1966 à nos jours

Diversification des acquis scientifiques

La période actuelle correspond à la phase des études détaillées de la distribution des sols à l'échelle des paysages élémentaires. Après la période précédente de cartographie systématique intensive, qui se prolonge d'ailleurs encore dans certains domaines géographiques (zone tropicale humide et forestière, domaine méditerranéen), il devient nécessaire de dresser un bilan des résultats acquis, de confronter les données, de les analyser et d'en saisir les limites. Cette réflexion est rendue possible par une plus grande disponibilité de temps laissée aux pédologues à cet effet, et par un regroupement des préoccupations autour de quelques thèmes généraux permettant l'échange et la confrontation des idées. C'est une période de production intense au niveau d'ouvrages généraux et de

thèses de doctorat d'Etat. Elle bénéficie d'acquisitions multiples dues aux effets combinés des années précédentes dans toute une série de domaines :

- d'abord dans la caractérisation morphologique et analytique des sols. L'inventaire ne cesse d'augmenter et de s'affiner. La recherche d'un langage commun s'impose concrètement dans la rédaction de glossaires pour la description des horizons et de l'environnement des profils en vue du traitement informatique. Une banque de données pédologiques est créée et des programmes d'exploitation sont élaborés et écrits ;
- parallèlement dans la connaissance de la répartition spatiale des unités pédologiques. Le contenu cartographique permet de reconnaître les relations des sols aux diverses échelles (séquences, distribution régionale, climatique, etc.) ;
- en même temps, les données de base disponibles dans le domaine de la géochimie et dans celui des connaissances relatives aux circulations dans les milieux poreux deviennent suffisamment précises pour élaborer des schémas interprétatifs solides ;
- enfin, sur le plan technique, les possibilités d'analyses chimiques, minéralogiques, physiques, continuent à se diversifier tant du point de vue quantitatif que qualitatif (méthode de la fluorescence X, quantométrie, spectrographie infra-rouge, etc.).

Les progrès techniques

Dans le domaine des techniques d'observation, les méthodes évoluent. En particulier, les possibilités nouvelles d'application de la microscopie, tant optique qu'électronique, à l'étude des sols permettent des investigations plus poussées et à des échelles toujours plus grandes. Les résultats obtenus offrent la possibilité d'exprimer en termes de succession dans le temps des arrangements dans l'espace et autorisent la distinction entre structures sédimentaires et pédologiques.

Sur le terrain, en complément des approches habituelles, les recherches portent plus spécifiquement, soit sur les différenciations latérales entre profils le long de chaînes de sols de plus en plus courtes, où les discontinuités sont particulièrement étudiées et les limites entre unités précisées, soit sur des processus actuels étudiés directement dans la nature : action antagoniste humectation/dessiccation et ses conséquences sur la structure du sol par exemple ; percolation de l'eau et entraînement des matériaux dissous ou figurés ; dynamique du soufre, etc.

Les leçons

Les études en géographie des sols introduisent deux notions complémentaires :

- le rôle de la différenciation latérale dans la distribution paysagique des sols,
- les analogies entre cette distribution et la zonalité des principales unités pédologiques intertropicales.

En effet, ces études mettent d'abord en évidence des relations génétiques et historiques entre les différents types de sols qui sont associés dans certains paysages. Il peut ainsi exister une continuité génétique entre les sols éluviaux amont et les sols d'accumulation aval d'où il résulte que les seconds succèdent aux premiers non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps.

La démarche biogéodynamique

Des paysages tropicaux représentent donc des systèmes « biogéodynamiques » qui comportent en eux-mêmes leur mécanisme d'autodéveloppement. Celui étudié au Tchad est déterminé par une pédogenèse latérale et remontante. Il est probable qu'il existe dans le monde bien d'autres types de systèmes comparables. Il découle de ceci cependant que, si les facteurs externes demeurent constants, la distribution des sols dans le paysage n'est fonction que de l'âge, c'est-à-dire de la durée d'évolution du système. C'est précisément ce que l'on observe sur certains modelés récents du Tchad (10 000 ans) qui n'ont été que très faiblement perturbés par des variations climatiques et tectoniques.

Par contre, sur les modelés anciens ce type de distribution peut être modifié par de nombreux mécanismes. Une variation des facteurs externes peut accélérer ou retarder l'évolution biogéodynamique du système ; de vieilles formations pédologiques peuvent participer plus ou moins à l'évolution récente et compliquer les différenciations (en particulier les cuirasses) ; des actions « catastrophiques » (tectonique, changements climatiques) peuvent modifier, voire même effacer les traces des systèmes anciens.

A l'opposé un sol « jeune », peu ou faiblement évolué, ne présente que l'amorce d'une différenciation verticale. Il est marqué fondamentalement par la nature de son matériau originel (andosols, sols bruns eutrophes par exemple). Les systèmes dans ces cas ne sont pas suffisamment individualisés pour être perceptibles.

Les systèmes pédologiques

Ces résultats se concilient avec les données régionales recueillies lors de la 2^e phase des travaux et complètent le concept historique en géographie des sols. Si l'on confronte ces études détaillées à l'ensemble des données de la cartographie synthétique à petite échelle, on constate l'existence d'analogies entre la distribution ordonnée de diverses unités pédologiques à l'échelle d'un paysage — distribution paysagique — et la distribution de ces mêmes unités à l'échelle de la succession, latitudinale et altitudinale, de ces zones bioclimatiques — distribution zonale —. L'ordre de succession est comparable, bien que la répartition relative dans la succession varie en fonction du gradient climatique. En domaine tropical subaride, les surfaces de sols d'accumulation dominent (vertisols, plansols, etc.). Allant vers les régions de plus en plus humides, on observe d'abord le développement des sols lessivés « amont » (sols ferrugineux tropicaux) ; les accumulations « aval » sont remplacées peu à peu par des sols hydromorphes à pseudogley, souvent cuirassés ou concrétionnés. Plus loin, le domaine ferrallitique se caractérise par la dominance des faciès éluviaux. Les produits entraînés sont exportés hors des profils et, pour les plus solubles, souvent jusqu'à la mer où ils précipitent (formation

entre autres des mangroves). A la limite les sols ferrallitiques eux-mêmes disparaissent. Il ne reste que des sables quartzeux qui présentent des différenciations podzoliques. La zonalité bioclimatique pourrait donc correspondre ainsi à la dominance successive de chacune des grandes unités pédologiques d'une même série évolutive générale.

Dans le schéma biogéodynamique les sols ne sont plus considérés comme le produit des divers facteurs du milieu auxquels était classiquement attribuée leur formation, mais sont inclus dans l'ensemble des paramètres du milieu avec lesquels ils sont en relation d'étroite interdépendance. Ils sont à la fois résultats et facteurs du milieu avec qui ils constituent un écosystème ou **biogéocénose**. C'est dans les régions tropicales sèches, sur les modelés récents, où les différenciations de sols sont courtes et tranchées et présentent des conditions d'observations favorables, que l'interprétation biogéodynamique a pu être appliquée et montrer tout l'intérêt qu'elle peut présenter. En dehors de la compréhension de la pédogenèse, elle contribue, d'une part à la connaissance de l'évolution des paysages jusque dans ses conséquences morphologiques, hydrologiques, hydro-géologiques, et d'autre part, elle apporte en retour, à des disciplines fondamentales comme la géochimie, des données sur les modalités originales de diversification de la couverture pédologique. Elle prépare ainsi à une approche expérimentale, puis théorique.

Les limites de la démarche

Dans d'autres régions, la démarche biogéodynamique paraît encore assez délicate d'emploi. En particulier, il semble y avoir quelques risques à l'appliquer trop strictement aux régions intertropicales humides. Les périodes d'évolution considérées sont là beaucoup plus longues, et se placent à une autre échelle (10 000 ans pour les modelés en zone sèche ; peut-être plusieurs millions d'années pour les modelés anciens de la zone humide encore actifs qui n'ont pas d'équivalents intacts en zone sèche). On est ainsi conduit à distinguer en milieu ferrallitique deux pédogenèses qui n'ont pas encore pu être raccordées :

- une pédogenèse ancienne de sols très profonds où l'on peut observer dans les premiers mètres une évolution sous l'influence des facteurs actuels (climat, végétation) et, en profondeur, une évolution le plus souvent figée, monotone d'aspect, mais qu'il n'est pas impossible de trouver encore actuelle dans certaines situations. Le résultat final est un processus de « soustraction » presque exclusif ;
- une pédogenèse récente de sols peu profonds, beaucoup plus diversifiés et se différenciant souvent très rapidement (appauvrissement, hydromorphie, induration) ; les processus peuvent être, selon le modelé, essentiellement une « soustraction » ou une « soustraction plus addition » à rapprocher de ce qui se passe en zone sèche ;
- une pédogenèse complexe dans tous les cas où s'interpénètrent faits anciens et récents.

En région aride où le déficit hydrique est manifeste, les différenciations latérales sont peu marquées ; elles ne touchent qu'une faible épaisseur des profils et sont principalement verticales. Il en est de même sur les matériaux récents, particulièrement altérables, comme les cendres volcaniques qui évoluent en andosols. On est alors obligé à revenir à une

approche pédologique plus classique, et il en est ainsi chaque fois que l'un des facteurs externes du milieu prend le pas sur les facteurs internes de la pédogenèse.

Les voies nouvelles

Pour éclairer certains de ces différents aspects un ensemble de recherches porte sur l'étude des mécanismes actuels d'évolution. Il s'agit de saisir sur des modèles naturels simples, judicieusement choisis, par des observations, des mesures directes sur la circulation des solutions (sens, longueur, flux) et sur celles des transferts de substances dont elles sont responsables (modalités, intensité, vitesse d'évolution), les mécanismes fondamentaux des premiers stades de différenciation des sols.

En agronomie, les principaux résultats concernent l'aménagement du paysage. Des solutions plus globales sont formulées. Elles complètent et regroupent l'acquis antérieur. Des réponses adaptées à l'avancement des travaux de mise en valeur sont recherchés dans le traitement informatique des données du sol et de son environnement. C'est un domaine en pleine extension sur lequel il est difficile actuellement de porter un jugement.

Le problème de la classification des sols

La classification des sols n'est pas modifiée. Les introductions précédentes sont confrontées sur le terrain. Il apparaît difficile de distinguer les principales sous-classes des sols ferrallitiques. La notion de remaniement est appliquée avec des fortunes diverses et est discutée. Mais plus que le contenu, c'est le principe même de la classification qui est mis en cause. L'ambition de notre classification est d'être à la fois un objet d'identification sans équivoque et le support de nos concepts. Est-ce possible ? La recherche de plus d'objectivité, une meilleure structuration de notre approche, une plus grande représentativité de nos résultats, sont les axes qui dirigent notre travail. Il faut concilier la notion d'unité paysagique et celle du profil. C'est un problème fondamental pour la classification qui n'ordonne actuellement que des différenciations verticales et leurs interprétations. De plus, les critères morphologiques retenus ont été la plupart choisis suffisamment perceptibles et contrastés « de visu » pour être saisis théoriquement sans ambiguïté. Mais cette démarche est-elle compatible, elle aussi, avec plus de réalité ?

Nos recherches tournent pour la plupart autour de ces préoccupations. Pour cela elles cherchent à parcourir les voies les plus diverses et à toutes les échelles de saisie de données (arrangements élémentaires, horizons, profils, paysages, territoires). Une certaine priorité est cependant donnée aux méthodes micromorphologiques, géochimiques, à celles des transferts de matières dans les milieux poreux, et, simultanément, un poids de plus en plus important est accordé à la notion d'organisation, complétement à une meilleure caractérisation des constituants du sol.

Le 10^e Congrès de l'A.I.S.S. de MOSCOU est l'occasion opportune de confronter résultats et orientations aux différents courants qui irriguent la pédologie contemporaine. L'exposé qui précède et les questions qu'il soulève, devraient permettre, à travers notre acquis et nos problèmes d'une part, de mieux faire comprendre nos concepts à nos collègues étrangers et, d'autre part, de mieux situer nos idées dans le contexte mondial de la Science du Sol.

Bibliographie

- AUBERT (G.) — 1954 — Les sols latéritiques. C. R. 5^e C. Int. Sc. Sol. I, 103-118.
- AUBERT (G.) — 1958 — Classification des sols. *Bull. ORSTOM* 8, pp. 1-3.
- AUBERT (G.) — 1963 — Classification des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, pp. 1-7.
- AUBERT (G.) — 1964 — Classification des sols utilisés par les pédologues français en zone tropicale ou aride. *Sols africains* IX, 1, pp. 97-106.
- AUBERT (G.) — 1965 — Classification des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, n° 3, pp. 269-288.
- AUBERT (G.) et SEGALIN (P.) — 1966 — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4, pp. 97-112.
- AUBERT (G.) — 1973 — Pédologie. *Encycl. Univ.* XII 683-691.
- AUDRY (P.) et al — 1972 — Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. *Bull. ORSTOM, sér. Pédol.* 18 p. multigr.
- AUDRY (P.) — 1967 — Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture. Colloque sur la fertilité des sols tropicaux. Tananarive (Madagascar) 19-27 nov. 24 p.
- BACHELIER (G.) — 1963 — La vie animale sous les sols. ORSTOM. *Init. et Doc. Tech.* n° 3, 280 p.
- BOCQUIER (G.) — 1972 — Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. *Mém. ORSTOM*, n° 62, 350 p., pl. phot.
- BOCQUIER (G.) et MAIGNIEN (R.) — 1963 — Les sols bruns subarides tropicaux d'Afrique de l'Ouest. *African soils*, vol. VIII, n° 3, pp. 359-370.
- BOISSEZON (P. de) — 1969 — Note sur la classification des sols ferrallitiques. ORSTOM, Abidjan (Côte-d'Ivoire), 13 p. bibl.
- BOISSEZON (P. de) — 1973 — Les sols ferrallitiques. t. 4 — La matière organique, ORSTOM, *Init. et Doc. Tech.*, sous presse.
- BOULET (R.) — 1970 — La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3, pp. 245-272.
- BOURGEAT (F.) — 1972 — Sols sur socle ancien à Madagascar. Type de différenciation et interprétation chronologique au cours du quaternaire. *Mém. ORSTOM* n° 57, 335 p.
- BOYER (J.) — 1970 — Essai de synthèse des connaissances acquises sur les facteurs de fertilité des sols en Afrique intertropicale francophone. Comité des sols tropicaux. Londres 8-12 juin 1970, 175 p. multigr.
- BOYER (J.) — 1972 — Le potassium sous les sols tropicaux. Comité des sols tropicaux. 26-30 octobre Washington (U. S. A.) National Academy of Sciences, pp. 104-135.
- CHATELIN (Y.) — 1972 — Eléments d'épistémologie pédologie. Application à l'étude des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 1, pp. 3-24.
- CHATELIN (Y.) — 1973 — Les sols ferrallitiques. t. 1. Historique — Développement des connaissances et formations des concepts actuels. ORSTOM *Init. Doc. Tech.* n° 20, 98 p.
- CHATELIN (Y.) et MARTIN (D.) — 1972 — Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 1, pp. 25-43.

- CHAUVEL (A.) — 1972 — Observation micromorphologique de la partie supérieure des sols rouges ferrallitiques de Casamance (Sénégal). Essai d'interprétation de la dynamique actuelle, sous couvert forestier. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 4, pp. 343-356.
- CHAUVEL (A.) — 1972 — Contribution des études granulométriques et microscopiques à l'étude des matériaux pédologiques. *ORSTOM, Bull. liaison Thème A*, pp. 43-64, multigr.
- CHEVERRY (C.) — 1968 — Rôle original de la pédogenèse sur la nature et le mode d'accumulation saline dans les polders de BOL (Tchad). PARIS, *Science du Sol A.F.E.S.* n° 2.
- CHEVERRY (C.) — 1969 — Salinisation et alcalinisation des sols des polders de BOL. Conséquences sur la fertilisation et l'aptitude à l'irrigation de ces sols. Ronéo ORSTOM, Fort-Lamy, 94 p., 16 fig.
- COLMET-DAAGE (F.) et al — 1965 — Caractères de quelques groupes de sols dérivés des roches volcaniques des Antilles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, pp. 91-125.
- COLMET-DAAGE (F.) et al — 1967-69 — Caractères de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, n° 1, pp. 3-38 ; vol. V, n° 4, pp. 353-392. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 4, pp. 495-560.
- COLMET-DAAGE (F.) et al — 1970 — Caractères de quelques sols dérivés de cendres volcaniques de la Côte du Pacifique du Nicaragua. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 2, pp. 113-172.
- DABIN (B.) — 1962 — Relations entre les propriétés physiques et la fertilité dans les sols tropicaux. *Ann. Agron.*, 13 (2), pp. 111-140.
- DABIN (B.) — 1969 — Etude générale des conditions d'utilisation des sols de la cuvette tchadienne. *Trav. et Doc. ORSTOM* n° 2, 199 p.
- DABIN (B.) et THOMANN (Ch.) — 1970 — Etude comparative de deux méthodes de fractionnement des composés humiques. *Sér. Init. Doc. Tech. ORSTOM* n° 16, 66 p.
- DELVIGNE (J.) — 1965 — Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique. *Mém. ORSTOM* n° 13, 156 p., 9 pl. h.-t.
- ESCHENBRENNER (V.) et GRANDIN (G.) — 1970 — La séquence des cuirasses et ses différenciations entre AGNIBILEKROU (Côte-d'Ivoire) et DIEBOUGOU (Haute-Volta).
- FAUCK (R.) — 1972 — Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale (contribution à l'étude des sols des régions tropicales). *Mém. ORSTOM* n° 61, 257 p., phot.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (Cl.) et THOMANN (Ch.) — 1969 — Bilans d'évolution des sols de Sefa Casamance (Sénégal), après quinze années de culture continue. *L'Agronomie Tropicale*, mars, vol. XXIV, n° 3, pp. 263-301.
- FOURNIER (F.) — 1960 — Climat et érosion. Paris, Presses Universitaires de France.
- FOURNIER (F.) — 1967 — La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain. *Sols africains : Lagos (Nigeria)* B. I. S. vol. XII, n° 1, 51 p.
- GAVAUD (M.) et BOULET (R.) — 1966 — Rapport sur la carte au 1/500 000 du Niger occidental. ORSTOM, Dakar, t. 2 et 3, 513 p., multigr., 1 carte.
- GRAS (F.) — 1970 — Surfaces d'aplanissement et remaniement des sols sur la bordure orientale du Mayombe (Congo Brazzaville). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3, pp. 273-294.
- GUICHARD (E.) — 1970 — Les sols du bassin du Rio Jaguaribe (Brésil). *Mém. ORSTOM* n° 40, 146 p., carte.
- HERVIEU (J.) — 1968 — Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical. *Mém. ORSTOM* n° 24, 465 p.
- HERVIEU (J.) — 1970 — Le Quaternaire du Nord Cameroun. Schéma d'évolution géomorphologique et relations avec la pédogenèse. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3, pp. 295-320.
- HUMBEL (F.-X.) — 1968 — Contribution à l'étude des sols à horizon caillouteux du Nord Cameroun. ORSTOM, Yaoundé, 55 multigr.

- KALOGA (B.) — 1966 — Etude pédologique des bassins versants des Volta Blanche et Rouge en Haute-Volta, 1^{re} partie — Le Milieu Naturel. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 1, pp. 23-61. 2^e partie — Les Vertisols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 3, pp. 29-61.
- LAMOUREUX (M.) — 1972 — Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogenèse fersiallitique au Liban. *Mém. ORSTOM* n° 56, 266 p.
- LAMOUREUX (M.) — 1972 — Essai de structuration pour une classification des sols et milieux de pédogenèse. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3, pp. 243-250.
- LAPORTE (G.) — 1962 — Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée COMILOG. ORSTOM Brazzaville, rapport ronéo, 149 p.
- LATHAM (M.) — 1971 — Rôle du facteur sol dans le développement du cotonnier en Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 1, pp. 29-42.
- LENEUF (H.) — 1959 — L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte-d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Paris, ORSTOM, 210 p.
- LEPOUTRE (B.) — 1963 — Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cédrails marocaines. *Ann. Rech. Forest. Maroc*, Rabat, t. 6, fasc. 2, 211 p.
- LEVEQUE (A.) — 1970 — L'origine de concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3, pp. 321-348.
- MAIGNIEN (R.) — 1958 — Le cuirassement des sols en Guinée. *Mém. Carte géol. Alsace Lorraine (Strasbourg)* n° 16, 239 p.
- MAIGNIEN (R.) — 1966 — Compte rendu de recherches sur les latérites. UNESCO, Paris IV, 155 p.
- MAIGNIEN (R.) — 1969 — Evolution de la notion « sol » au cours de vingt années d'études pédologiques en Afrique. ORSTOM, Yaoundé (Cameroun), 15 p. multigr.
- MARTIN (D.) — 1967 — Géomorphologie et sols ferrallitiques dans le Centre Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. V, n° 2, pp. 189-218.
- MARTIN (G.) — 1970 — Synthèse agro-pédologique des études ORSTOM dans la vallée du Niari, en République du Congo Brazzaville. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 1, pp. 63-80.
- NALOVIC (Lj.) et HUMBEL (F.-X.) — 1971 — Contribution à l'étude de la localisation des différentes formes de composés du fer au sein de quelques sols du Cameroun. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3, pp. 271-306.
- PERRAUD (A.) — 1971 — La matière organique des sols forestiers de la Côte-d'Ivoire. Relations sol, végétation, climat. Thèse, Nancy, 86 p. (sous presse).
- PIAS (J.) — 1970 — Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. *Mém. ORSTOM* n° 43, 407 p., carte.
- PIAS (J.) — 1970 — La végétation du Tchad. Ses rapports avec les sols. Variations paléobotaniques ou quaternaires. *Trav. et Doc. ORSTOM* n° 6, 47 p., 1 carte.
- QUANTIN (P.) — 1972 — Les Andosols. Rev. bibliographique des connaissances actuelles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. X, n° 3, pp. 273-301.
- RIQUIER (J.) — 1969 — Contribution à l'étude des « stones-lines » en régions tropicales et équatoriales. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1, pp. 71-112.
- ROOSE (E.-J.) — 1968 — Notice technique : un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 2, pp. 235-250.
- ROOSE (E.-J.) — 1973 — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de la Basse Côte-d'Ivoire. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu tropical. Thèse Ing. Doc. Abidjan, 124 p. multigr.
- RUELLAN (A.) — 1971 — L'histoire des sols : quelques problèmes de définition et d'interprétation. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3, pp. 335-344.

- RUELLAN (A.) — 1972 — Contribution à la connaissance des sols des régions méditerranéennes : les sols à profil calcaire différenciés des plaines de la Basse Moulouya (Maroc Oriental). *Mém. ORSTOM* n° 54, 302 p.
- SEGALEN (P.) — 1957 — Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar. *Mém. I.R.S.M.*, sér. D, t. VIII, 182 p.
- SEGALEN (P.) — 1964 — Le Fer dans les sols. ORSTOM, sér. *Init. Doc. Tech.* n° 4, 152 p.
- SEGALEN (P.) — 1968 — Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VI, n° 1, pp. 105-126.
- SEGALEN (P.) — 1973 — L'Aluminium dans les sols. ORSTOM, sér. *Init. Doc. Tech.*, n° 22, 281 p.
- SIEFFERMANN (G.) — 1973 — Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun (Variations pédologiques et minéralogiques du milieu équatorial en milieu tropical). *Mém. ORSTOM* n° 66, 183 p.
- SOUCHERE (P. de la) — 1966 — Utilisation des courbes de formes du relief analysées sur les photographies aériennes dans l'interprétation cartographique des toposéquences de sols. C.R. II. Symp. Intern. Photo-interprétat. Paris IV, n° 1, pp. 141-000.
- SOUCHERE (P. de la) — 1969 — Approches méthodologiques de l'interprétation des photographies aériennes dans la cartographie pédologique en zone forestière sud camerounaise. ORSTOM Adiopodoumé (Côte-d'Ivoire), 9 p. multigr.
- TERCINIER (G.) — 1971 — Contribution à la connaissance des phénomènes de bauxitisation et d'allitisation. Les sols de karsts d'atolls surélevés du sud-ouest Pacifique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3, pp. 307-334.
- VALLERIE (M.) — 1973 — Contribution à l'étude des sols du Centre Sud Cameroun. Types de différenciation morphologique et pédogénétique sous climat subéquatorial. *ORSTOM, sér. Trav. et Doc.* n° 29, 111 p. + Carte h.-t.
- VAN DEN DRIESCHE (R.) et GARCIA GOMEZ (A.) — 1972 — Distances non paramétriques entre profils. *Rev. Ecol. Biol. Sol*, t. IX, 4, pp. 617-628.
- VIEILLEFON (J.) — 1971 — Contribution à l'étude du cycle du soufre dans les sols de mangrove : ses rapports sur l'acidification naturelle ou provoquée. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 3, pp. 241-270.
- VIEILLEFON (J.) — 1969 — La pédogenèse dans les mangroves tropicales. Un exemple de chronoséquence. *Science du Sol, A.F.E.S.*, n° 2, pp. 115-148.
- VIZIER (J.-F.) — 1970 — Etude des phénomènes d'hydromorphie et de leur déterminisme dans quelques types de sols du Tchad. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 1, pp. 33-48.

Achevé d'imprimer le 21 Juin 1974, sur
les presses de l'IMPRIMERIE H. DRIDÉ
162, Av. du Général Gallieni - 93140 BONDY
N° Imprimeur 75.687 - Imprimé en France
Dépôt légal - 2^e Trimestre - Année 1974